

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE INFORMÁTICA



*Entorno de Simulación Para Flota de  
Robots Orientado a la Gestión de Malas  
Hierbas en Cultivos*

Luis Alfredo EMMI

Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Informática para la Industria  
MÁSTER EN INVESTIGACIÓN EN INFORMÁTICA

Convocatoria de Junio 2011

Calificación Obtenida: 9.0 (Sobresaliente)

Directores:

Prof. Gonzalo Pajares Martinsanz / Dr. Pablo González de Santos

2010 – 2011



# ENTORNO DE SIMULACIÓN PARA FLOTA DE ROBOTS ORIENTADO A LA GESTIÓN DE MALAS HIERBAS EN CULTIVOS

Luis Alfredo EMMI

MÁSTER EN INVESTIGACIÓN EN INFORMÁTICA, FACULTAD DE INFORMÁTICA,  
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID



Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Informática para la Industria

2010 - 2011

Directores:

Prof. Gonzalo Pajares Martinsanz / Dr. Pablo González de Santos



## **Autorización de Difusión**

Luis Alfredo EMMI

2010 - 2011

El abajo firmante, matriculado en el Máster en Investigación en Informática de la Facultad de Informática, autoriza a la Universidad Complutense de Madrid (UCM) a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a su autor el presente Trabajo Fin de Máster: “ENTORNO DE SIMULACIÓN PARA FLOTA DE ROBOTS ORIENTADO A LA GESTIÓN DE MALAS HIERBAS EN CULTIVOS”, realizado durante el curso académico 2010-2011 bajo la dirección del Profesor Gonzalo Pajares Martinsanz y con la colaboración externa de dirección del Dr. Pablo González de Santos en el Departamento de Control Automático del Centro de Automática y Robótica, UPM-CSIC, y a la Biblioteca de la UCM a depositarlo en el Archivo Institucional E-Prints Complutense con el objeto de incrementar la difusión, uso e impacto del trabajo en Internet y garantizar su preservación y acceso a largo plazo.

Fdo.: Luis Alfredo EMMI



*A mi nonno Antonio*





## **Resumen en castellano**

En los últimos años, y gracias a nuevos avances tecnológicos, han surgido varias técnicas enfocadas al manejo de agroquímicos, las cuales ofrecen diferentes alternativas en el uso intensivo de estos productos en la agricultura industrial. Estas técnicas, que se encuentran dentro de lo que se conoce como Agricultura de Precisión, buscan controlar la dosis de dichos productos (fertilizantes, herbicidas, etc.), para que se adecue a las necesidades del terreno tratado, disminuyendo el impacto en la salud del consumidor y en el medio ambiente.

Últimamente ha surgido una tendencia en el uso de unidades autónomas para la aplicación de este tipo de técnicas, como es el caso del proyecto RHEA, que se enfoca en el diseño, desarrollo y evaluación de nuevas generaciones de sistemas automáticos y robóticos para el control efectivo de malas hierbas. Esto se realizará utilizando una flota de robots formada, tanto por unidades aéreas como unidades terrestres, equipadas con sensores avanzados, así como nuevas herramientas y algoritmos para aumentar el rendimiento en el control y la toma de decisiones.

En base al proyecto RHEA, se ha desarrollado un entorno de simulación que permite observar y evaluar la ejecución de tareas agrícolas utilizando una flota de robots. Dicho entorno permitirá la configuración del campo de cultivo, así como la estructura de la flota y los diferentes sensores y actuadores que se incorporan a cada robot, mediante dos interfaces diferentes: una interfaz de configuración y otra interfaz gráfica, que interactúan entre sí. Para evaluar el entorno desarrollado se ha diseñado e implementado una misión para la flota de robots que simula la gestión de malas hierbas mediante técnicas avanzadas de reconocimiento y toma de decisiones.

Este entorno permitirá la realización de simulaciones en tres dimensiones y videos realistas, lo cual otorgará una buena representación y un mejor entendimiento de la labor de robots en actividades agrícolas para personas de diferentes áreas de investigación que se encuentran involucradas en el diseño y aplicación de técnicas de Agricultura de Precisión.

## **Palabras clave**

Agricultura de precisión, flotas de robots, gestión de malas hierbas, simulación.

## **Resumen en inglés**

In the past decades, and due to new technological advances, several techniques have emerged, focused on the management of agrochemicals, which offers different alternatives in the intensive use of these products in the industrial agriculture. These techniques, which belong to the topic termed Precision Agriculture, seek to control the dose of such products (fertilizers, herbicides, etc.) to suit the treated soil needs, decreasing the environmental and consumer health impact.

Lately, a tendency to perform these techniques by using autonomous units has raised, as the case of the RHEA project, which focuses on the design, development and evaluation of new generations of automatic and robotic systems for effective weed control. This is done by using a robot fleet, both terrestrial and aerial units, equipped with advanced sensors, as well as new tools and algorithms, in order to improve the control and decision making performance.

Based on the RHEA project, a simulation environment has been developed, that allows the execution of agricultural tasks to be observed and evaluated. With this environment, the farmland, the robot fleet and the different sensors and actuators incorporated in each robot can be configured by means of two different interfaces: a configuration interface and a graphical interface, that interact each other. In order to evaluate the environment developed, a mission that simulates a weed control task in a field (through advance techniques of recognition and decision making using a robot fleet) has been designed and implemented.

This simulation environment allows a realistic 3D simulations and videos to be executed, which grant a good representation and a better understanding of the robot labor in agriculture activities for people from different research areas, that might be are involved in the design and application of Precision Agriculture techniques.

## **Keywords**

Precision Agriculture, Robot Fleet, Weed Control, Simulations.

# Índice de contenidos

Autorización de Difusión .....	v
Resumen en castellano .....	ix
Palabras clave.....	ix
Resumen en inglés .....	x
Keywords .....	x
Índice de contenidos .....	1
Agradecimientos .....	3
Capítulo 1 - Presentación del problema y objetivos .....	5
1.1 Introducción .....	5
1.2 Estructura de la memoria .....	7
1.3 Objetivos.....	7
1.3.1 Objetivos generales.....	7
1.3.2 Objetivos específicos .....	8
Capítulo 2 - Robótica y simulación en agricultura .....	9
2.1 Introducción .....	9
2.2 Técnicas de gestión de malas hierbas utilizando sistemas robotizados .....	11
2.3 Principales variables asociadas a la gestión de malas hierbas .....	14
2.4 Simuladores aplicados a la agricultura .....	18
2.5 Simuladores de flotas de robots .....	19
2.5.1 Webots .....	20
2.5.2 Lenguaje VRML .....	22
Capítulo 3 - Simulador para flota de robots en agricultura de precisión .....	25
3.1 Introducción .....	25
3.2 Creación del Universo de Simulación .....	27
3.2.1 Configuración de la topografía del terreno .....	28
3.2.2 Configuración del cultivo.....	29
3.2.3 Configuración de la infestación por malas hierbas .....	33
3.3 Flota de Robots .....	36
3.3.1 Unidad Aérea .....	37

3.3.2 Unidades Terrestres .....	38
3.4 Evaluación del entorno de simulación .....	45
3.4.1 Controlador de la unidad Aérea .....	46
3.4.2 Controlador de la unidad Terrestre .....	46
3.4.3 Controlador Supervisor .....	49
Capítulo 4 - Resultados .....	53
Capítulo 5 - Conclusiones .....	61
Referencias Bibliográficas .....	65

## **Agradecimientos**

En primer lugar quisiera agradecer a los directores de este proyecto, al Dr. Pablo González de Santos y al Profesor Gonzalo Pajares Martinsanz. Agradezco a Pablo su dedicación, apoyo, gran disposición para ayudarme y mucha paciencia a lo largo de la realización de este proyecto. Le debo mucho de lo que he aprendido en este tiempo. Al Profesor Pajares por su gran colaboración, orientación y consejos en todo momento, lo que ha hecho posible la realización de este Trabajo de Máster.

Agradezco a la dirección del Centro de Automática y Robótica, UPM-CSIC, por los medios prestados para la realización de este Trabajo de fin de Máster. Agradezco a mis compañeros del Departamento de Control Automático, especialmente a Jesús Pestana Puerta y Leonel Paredes Madrid, por su gran apoyo y ayuda. También quisiera agradecer a Abner Guilherme y Manuel Cestari por su colaboración en la realización de este trabajo.

Agradezco, además, al Profesor Andrea Peruzzi del Departamento de Agronomía y Gestión del Agrosistema (DAGA) de la Facultad de Agraria de la Universidad de Pisa en Italia, así como a su grupo de trabajo, por el cariño, afecto y disposición para ayudarme en los 3 meses que trabajé con ellos.

Quisiera además agradecer a mis padres, Sarino y Ana María, por todo lo que me han dado y me siguen dando en esta vida, por su entrega y constante amor. Al mismo tiempo, agradecer el apoyo y cariño de mis abuelas, Concetta y Donatina, y hermanos, Antonio, Rafael, Gabriel y Mariana.

Este trabajo ha sido financiado por una beca predoctoral de Formación de Personal Investigador (FPI) del Ministerio de Ciencia e Innovación, con referencia BES-2009-017062 y asociada al proyecto DPI2007-65728 en el Departamento de Control Automático.



# Capítulo 1 - Presentación del problema y objetivos

## 1.1 Introducción

La agricultura es una de las actividades básicas más importante para el ser humano, causante de nuestra expansión como especie y una gran generadora de cambios, que en el siglo pasado transitó desde los modelos agrícolas tradicionales de autoabastecimiento y circuitos locales a uno industrial de mercado globalizado. Esta agricultura industrial se basa en la aplicación de un gran número de insumos (pesticidas, fertilizantes y agua), en el empleo intensivo de maquinaria y en los subsidios económicos (Lassaletta y Rovira 2005).

Aunque la agricultura industrial ha conseguido un aumento en la productividad de los suelos, algunos especialistas indican que hoy en día esta actividad es insostenible. El abandono del medio rural, la pérdida de los conocimientos agrícolas tradicionales y de variedades autóctonas, la crisis de rentabilidad de muchas especies de cultivo, el *dumping* (subvención de algunas variedades de cultivo que permite vender por debajo del precio de producción), la destrucción de economías agrarias de países desfavorecidos, erosión, destrucción de suelos, contaminación, despilfarro energético, alteraciones de la red hidrográfica y de los ciclos biogeoquímicos y, finalmente, una contribución al cambio y calentamiento globales, son algunas de las consecuencias del uso intensivo de grandes extensiones de terreno y la aplicación desmedida de componentes químicos para la mejora en la productividad agrícola.

En las últimas dos décadas han surgido nuevas técnicas para el manejo de estos insumos sobre el campo de cultivo, las cuales ofrecen algunas alternativas diferentes al uso intensivo de estos en la agricultura industrial. Estas técnicas se basan en el conocimiento de las necesidades del terreno y el cultivo para determinar la dosis exacta de productos químicos que suplan estas necesidades. Estas técnicas se encuentran dentro de la llamada Agricultura de Precisión (AP) y permiten, en diferentes zonas dentro de un mismo campo de cultivo, realizar la aplicación de insumos según los requerimientos (Robert 2002; Zhang et al. 2002; Cook y Bramley 1998).

Las decisiones sobre el manejo de la dosis de siembra, fertilizantes, herbicidas, etc., a aplicar sobre determinadas áreas dentro de un mismo campo de cultivo, depende de las características del suelo, de las infestaciones de las malezas, plagas o enfermedades, y de los criterios de producción establecidos por el agricultor. Esto ofrece el potencial de alterar

fundamentalmente los sistemas de producción agraria, aumentando su rentabilidad económica y disminuyendo el impacto ambiental.

En la actualidad han surgido nuevas tendencias en la aplicación de estas técnicas de AP mediante el uso de robots y sistemas autónomos, tales como los proyectos europeos del 7º Programa Macro, titulados “*Robot Fleets for Highly Effective Agriculture and forestry Management*” (RHEA 2011), e “*Intelligent sensing and manipulation for sustainable production and harvesting of high value crop*” (CROPS 2010), además de varios trabajos de investigación en diferentes partes del mundo (Åstrand y Baerveldt 2002; Blasco et al. 2002; Lee et al. 1996; Jeon y Tian 2009; Lee et al. 1999; Iida et al. 2008).

En tal sentido, y siguiendo las nuevas tendencias en el uso de sistemas robotizados para la realización de tareas de precisión en la industria agrícola, se fija el objetivo de este trabajo en el **diseño de un entorno de simulación donde se pueda observar y evaluar la ejecución de tareas agrícolas utilizando flotas de robots**. El entorno de simulación se encuentra conformado por dos herramientas computacionales comerciales, las cuales permiten configurar y observar en un mundo virtual en 3D la simulación de flota de robots ejecutando dichas tareas.

El principal motivo del desarrollo de este entorno de simulación es disponer de una plataforma mediante la cual sea posible la observación y evaluación de nuevas técnicas de AP para la gestión de malas hierbas. Otro motivo por el que se ha diseñado este entorno de simulación es tener a disposición una aplicación computacional la cual permita una mejor comprensión sobre el uso de nuevas tecnologías y sistemas autónomos aplicables en la agricultura. Este entorno de simulación permitirá a personas de diferentes áreas que trabajan en la creación de nuevas metodologías agrícolas tener una visión más amplia en el uso y la aplicación de estas nuevas tecnologías que pueden no ser muy bien conocidas.

La principal aportación del desarrollo de este entorno de simulación es la integración de diferentes herramientas (programación y simulación de flota de robots) para su aplicación en el área de la AP. Se espera que el uso de este entorno de simulación logre incentivar la aplicación de las técnicas de AP mediante la presentación de simulaciones y videos de posibles aplicaciones en cultivos reales.



## **1.2 Estructura de la memoria**

Esta memoria se organiza en cinco capítulos. El presente capítulo se centra en la presentación del problema y el establecimiento de los objetivos. En el capítulo 2 se realiza una revisión del estado de algunas técnicas de AP ejecutadas mediante el uso de robots, así como un estudio de posibles variables en el campo de cultivo que se encuentren relacionadas directamente con la gestión de malas hierbas. Además, se realiza una revisión de simuladores, tanto aplicados a la agricultura como a flota de robots. La presentación del diseño y desarrollo del entorno de simulación en donde se especifica la labor de las herramientas computacionales que conforman dicho entorno se establece en el capítulo 3, donde se detallan los diferentes diseños realizados en cuanto a la configuración del campo de cultivo virtual y a la creación de los robots que lo componen, además de ilustrar cómo es posible realizar simulaciones con esta aplicación. En el capítulo 4 se presentan resultados generados con el entorno de simulación con el objetivo de validarlo. Finalmente, en el capítulo 5 se extraen las conclusiones pertinentes y el aporte realizado, lo cual da pie al inicio de la investigación en los estudios de Doctorado.

## **1.3 Objetivos**

Esta sección define los objetivos generales y detalla los específicos de este trabajo de fin de máster.

### ***1.3.1 Objetivos generales***

El principal objetivo de este trabajo de fin de máster es el diseño de una herramienta computacional capaz de realizar simulaciones de flotas de robots que efectúan tareas de gestión de malas hierbas sobre campos de cultivos. Esta herramienta ha sido diseñada para permitir la realización de simulaciones y videos realistas, lo cual permitirá una buena representación y un mejor entendimiento de la labor de robots en actividades agrícolas para personas de diferentes áreas de investigación que se encuentran involucradas en el diseño y aplicación de técnicas de AP. Como parte principal de este trabajo se ha buscado que la herramienta sea suficientemente flexible para poder representar la simulación de diferentes técnicas para la gestión de malas hierbas así como sobre diferentes tipos de cultivos. La integración de los elementos necesarios para el desarrollo de la herramienta, junto con la creación de modelos propios, constituye la principal aportación del trabajo que se presenta.

### ***1.3.2 Objetivos específicos***

Como objetivos específicos de este trabajo de fin de máster se establecen:

1. Estudio de técnicas de Agricultura de Precisión para la gestión de malas hierbas mediante el uso de robots y unidades autónomas.
2. Estudio de los diferentes aspectos del terreno que se relacionan con la ejecución de técnicas de AP mediante robots para la gestión de malas hierbas.
3. Representación realista de la distribución espacial tanto del cultivo como de las malas hierbas dentro de un campo virtual en 3D.
4. Desarrollo de las diferentes interfaces necesarias para la configuración y ejecución de simulaciones de flota de robots ejecutando tareas agrícolas.
5. Diseño e implementación de una misión específica (gestión química de malas hierbas) para la flota de robots del proyecto RHEA con el objetivo de evaluar el entorno de simulación diseñado.
6. Generación de simulaciones con el objetivo de presentar los resultados del proyecto RHEA.

## **Capítulo 2 - Robótica y simulación en agricultura**

### **2.1 Introducción**

El objetivo de la agricultura de precisión es poner a disposición del agricultor toda la información necesaria sobre las variaciones agronómicas dentro de la parcela, para que en cada metro cuadrado de terreno se labre, fertilice, siembre, riegue, etc., en la proporción idónea para conseguir la máxima producción posible de cada punto. Esto generaría una reducción en los costes de producción y una gestión agrícola más respetuosa con el medio ambiente (Valero-Ubierna 2001).

Las variaciones agronómicas que influyen significativamente en la producción agrícola se pueden categorizar en 6 grupos de variabilidad atendiendo al (Zhang et al. 2002):

1. Rendimiento (histórico de la distribución del rendimiento),
2. Terreno (topografía, elevación, aspecto, etc.),
3. Suelo (fertilidad, humedad, propiedades mecánicas, eléctricas y químicas, etc.),
4. Cultivo (densidad, altura, nutrientes, biomasa, calidad, etc.),
5. Factores anómalos (infestaciones, enfermedades, daños por el ambiente) y
6. Gestión del terreno (aplicación de fertilizantes, pesticidas, herbicidas, rotación de cultivos, etc.).

Muchos tipos de variables dentro de estos grupos son tanto de naturaleza espacial como temporal. La variabilidad en el rendimiento se considera la variable principal que depende de las demás, mientras que la mayoría de las demás variabilidades son consideradas como independientes. Es necesario el conocimiento de las variaciones tanto temporales como espaciales de los factores mencionados para así, mediante el uso de Sistemas Expertos para la toma de decisiones en la agricultura, sea posible la generación de estrategias que permitan aumentar el rendimiento del terreno. En tal sentido, la agricultura de precisión no es otra cosa que transformar datos en decisiones (Fernández-Quintanilla 2006), las cuales permitirán optimizar el uso de recursos costosos, tales como fertilizantes, herbicidas, insecticidas, etc., además de reducir los contaminantes ambientales, facilitar la gestión de la explotación agrícola e incrementar la producción.

El tratamiento teórico en el análisis de la toma de decisiones agrícolas puede ser resumido como un ciclo de observación (realización de medidas), interpretación y evaluación

(procesamiento y planificación) y por último implementación (actuación) (Cook y Bramley 1998). Existen dos posibles enfoques cuando se gestionan las variaciones dentro del campo de cultivo: uno basado en mapas y otro basado en sensores (Zhang et al. 2002). En el enfoque basado en mapas, las medidas son realizadas primero en el campo, luego se generan mapas mediante análisis de laboratorio los cuales indican las zonas específicas en donde se debe realizar el tratamiento y la cantidad de dosis a aplicar, y por último se ejecuta en el campo de cultivo la acción del tratamiento en función a los mapas generados.

Por otra parte, en el enfoque basado en sensores, las propiedades del campo que se desean conocer son medidas utilizando sensores en tiempo real incorporados en los tractores o unidades móviles utilizadas, a la vez que se procesa esta información y se controla la aplicación del insumo también en tiempo real.

La tendencia actual en este ámbito es la combinación de la información de la producción obtenida en varios años, con la cual se generan mapas de rendimiento del terreno, acompañada con la información de las características principales del terreno y sumada a la información experimental obtenida por el propio agricultor en ensayos de su campo, para la definición de diversas zonas de tratamiento. Estas zonas de tratamiento pueden ser gestionadas gracias al concepto *Variable Rate Technology* (VRT), que es la metodología mediante la cual se aplica el insumo según una tasa determina y en un tiempo específico, en base a los análisis realizados y mapas creados (Lawes y Robertson 2011). En la actualidad existen varias empresas que comercializan este tipo de técnicas, tales como Raven Industries, Inc (2010), Micro-Trak Systems, Inc (2008) y Dickey-John Corporation (2011), entre otras.

Las técnicas comentadas anteriormente se desarrollaron gracias a n uevos avances tecnológicos, tales como los sistemas de posicionamiento global o GPS (*Global Positioning System*), y de la visión por computador, entre otros. Estos nuevos desarrollos han ayudado a crear una tendencia en la evaluación del uso de sistemas automáticos, específicamente de unidades móviles autónomas, para la realización de labores agrícolas que requieren de un alto grado de precisión y esfuerzo. Una de las prácticas agrícolas que está siendo investigada para su automatización es la eliminación de las malas hierbas que se encuentran dentro de las líneas de cultivo. La mala hierba, o flora espontánea, presenta un problema a la hora de su eliminación, ya que debe ser extraída o de forma manual, o mediante ciertas técnicas especializadas que, en algunos casos, pueden poner en peligro al cultivo en sí.

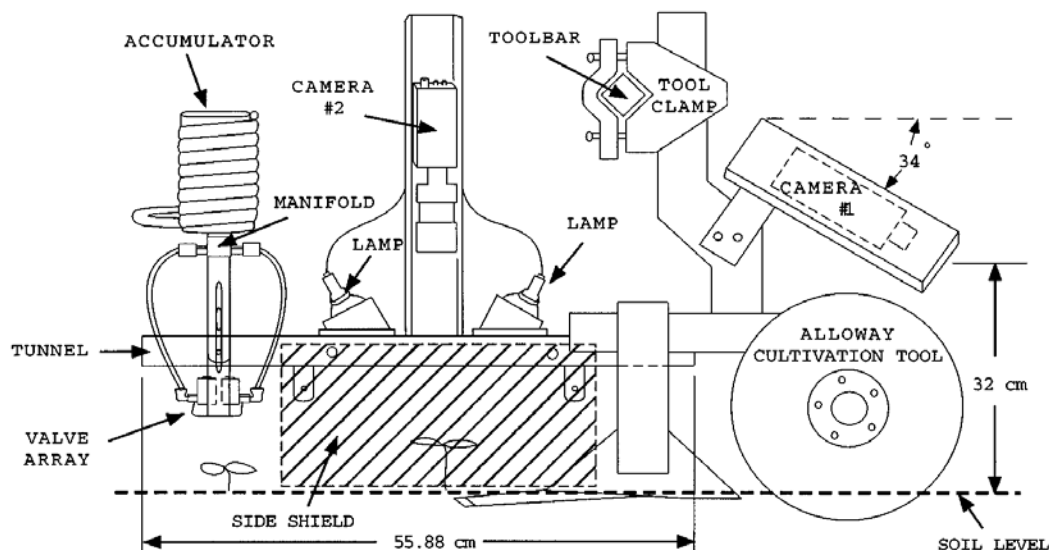
Actualmente el proyecto RHEA, mencionado anteriormente, se enfoca en el diseño, desarrollo y evaluación de nuevas generaciones de sistemas automáticos y robóticos para el control efectivo de malas hierbas. Este proyecto se encuentra orientado tanto a los campos de la agricultura como de la silvicultura utilizando mecanismos de eliminación químicos y/o mecánicos. El objetivo de RHEA es la disminución en el uso de insumos químicos agrícolas en un 75%, mejorando la calidad del cultivo, garantizando la salubridad para los humanos, y reduciendo los costos de producción mediante la gestión sostenible de los cultivos. Esto se realizará utilizando una flota de robots, tanto aéreos como terrestres, equipados con sensores avanzados, así como nuevas herramientas y algoritmos para mejorar el control y la toma de decisiones.

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto RHEA, y se ha enfocado en el desarrollo de una aplicación computacional que permita la ejecución de simulaciones de flotas de robots en cooperación realizando tareas agrícolas. Como el proyecto RHEA busca el desarrollo de nuevos sistemas para la gestión de la flora espontánea en cultivos, se ha orientado el diseño del entorno, dígase la configuración del campo de cultivo y de los robots, para que sea capaz de representar tareas de gestión de malas hierbas.

Para lograr esto, primero se han estudiado diferentes técnicas de gestión de malas hierbas, tanto químicas como mecánicas, eléctricas y térmicas, las cuales se aplican mediante el uso de unidades autónomas, dotadas con avanzados sistemas de percepción y actuación, para la aplicación de técnicas de AP. Además de esto, se han identificado las diferentes variabilidades que pudieran afectar directamente sobre el comportamiento de la flota de robots y sobre la gestión de la infestación en el campo, mientras ejecutan las tareas asignadas. Por último, se han analizado diferentes herramientas computacionales existentes para realización de simulaciones en agricultura y simulaciones sobre flotas de robots.

## **2.2 Técnicas de gestión de malas hierbas utilizando sistemas robotizados**

En los últimos años han surgido varios desarrollos relacionados con el uso de sistemas automáticos para la gestión de malas hierbas. Algunos de estos sistemas se encargan de controlar la aplicación de químicos en los campos de cultivos de manera no uniforme, con el propósito de reducir el uso de los fertilizantes y herbicidas, a la vez que se reducen los costos de producción y se protege el medio ambiente.



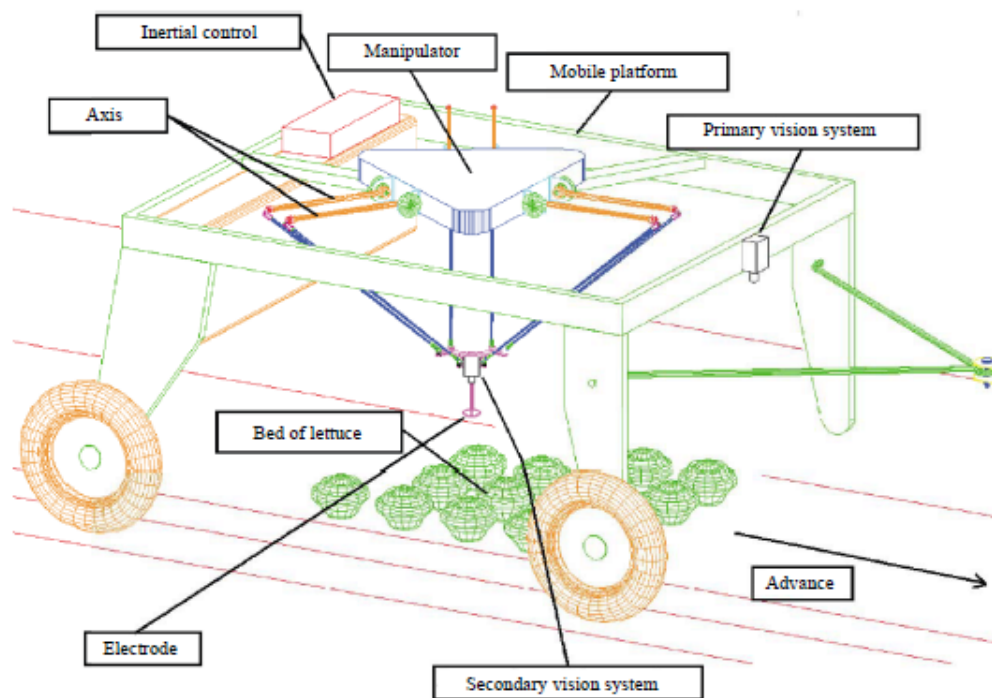
**Fig. 2-1. Prototipo del sistema robótico desarrollado por Lee et al. (1999)**

Por nombrar algunos ejemplos de estos sistemas, se puede mencionar el trabajo de investigación realizado por Lee et al. (1999), donde se desarrolló y probó un sistema robótico inteligente de tiempo real para una pulverización selectiva sobre las malas hierbas que se encuentran dentro de las líneas de cultivo (véase la Fig. 2-1). El sistema se encuentra compuesto por una plataforma móvil, dos sistemas de visión artificial, uno para guiar al robot por los surcos y otro para la detección de las malas hierbas, además de un sistema de pulverización preciso.

Un trabajo de investigación parecido al anterior es el realizado por Tian (2002), en donde se desarrolló y probó un pulverizador automático que utiliza un sistema de visión artificial de baja resolución en tiempo real y unos algoritmos especializados, para la detección de la densidad de la cobertura en las zonas infestadas por malas hierbas. El tamaño de estas zonas fue diseñado para ajustarse a un pulverizador *boom* estándar de post-emergencia.

En otro trabajo de investigación realizado por Jeon y Tian (2009) utilizan un mecanismo de aplicación directa de herbicida implementado en el elemento final de un manipulador, instalado en una plataforma robótica de cuatro ruedas del tipo *skid steering*. El elemento final fue diseñado especialmente para cortar el tallo de la mala hierba, limpiar la superficie tallada y simultáneamente aplicar productos químicos dentro del tejido vascular de la mala hierba.

Además de la tendencia en el desarrollo de sistemas de actuación automáticos para la aplicación controlada de químicos, también existe la tendencia del desarrollo de unidades móviles autónomas con el fin incorporar estos tipos de sistemas de actuación sobre ellas. Bakker

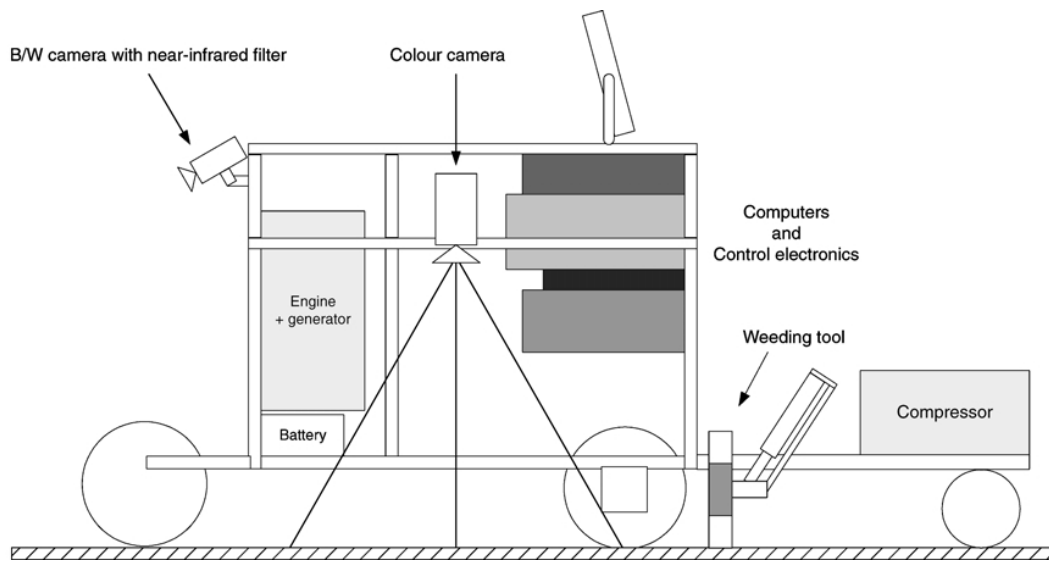


**Fig. 2-2. Esquema del sistema de gestión eléctrico de malas hierbas desarrollado por Blasco et al. (2002)**

(2009) diseñó e implementó un sistema autónomo enfocado en la eliminación automática de malas hierbas, el cual se encuentra compuesto por una plataforma robótica de cuatro ruedas, que integra un sistema de visión para la detección de las líneas de cultivo de remolacha. Mediante esta detección, la plataforma móvil es capaz de desplazarse por el campo sin poner en peligro al cultivo.

Algunos autores han dado un paso más adelante y han logrado incorporar sistemas de actuación robotizados para la eliminación precisa de las malas hierbas en unidades o plataformas móviles autónomas. Blasco et al. (2002) desarrollaron un brazo robótico, sujetado sobre una plataforma móvil arrastrada por un tractor, el cual elimina las malas hierbas mediante el uso de descargas eléctricas (véase la Fig. 2-2). Estos investigadores usaron un sistema de visión artificial con el objetivo de localizar individualmente cada una de las malas hierbas en un continuo trabajo de campo. Además, usaron un control inercial y un sistema de visión artificial secundario para compensar las perturbaciones introducidas por las irregularidades del terreno.

Otros desarrollos orientados a la eliminación de malas hierbas mediante el uso de unidades móviles autónomas son los realizados por Åstrand y Baerveldt (2002), que diseñaron



**Fig. 2-3. Esquema del robot móvil desarrollado por Åstrand & Baerveldt (2002), con la herramienta de gestión de malas hierbas montada en la parte trasera del robot**

un robot móvil guiado por visión artificial, el cual ejecuta un control mecánico de malas hierbas entre las plantas dentro de las líneas de cultivo para remolacha. Además, utilizan dos sistemas de visión, uno para reconocer la estructura de las líneas de cultivo para poder guiar al robot sobre el campo de remolacha, y el otro para reconocer la planta de remolacha sobre las malas hierbas y controlar el sistema de eliminación de la flora espontánea (véase la Fig. 2-3). La herramienta mecánica para la eliminación de las malas hierbas es una rueda la cual rota perpendicularmente a la línea de cultivo, y solamente actúa en el área entre las plantas. La acción para levantar y descender a la herramienta se controla con un cilindro neumático.

### **2.3 Principales variables asociadas a la gestión de malas hierbas**

Una de las características principales del entorno desarrollado en este trabajo es que permite la simulación de tareas agrícolas mediante flota de robots sobre cualquier tipo de cultivo. Dependiendo del tipo de cultivo, la separación entre las líneas de cultivo y la colocación de las plantas dentro de una misma fila son diferentes. Por ejemplo, el maíz se puede cultivar con un espaciamiento entre hileras de 50 cm. a 75 cm., lo cual depende de la zona en donde se cultiva, de la cantidad de agua disponible y del criterio del agricultor, entre otros. En tal sentido, la configuración de cada robot individual, de la flota de robots y de la gestión de las malas hierbas se encontrará asociada a la distribución espacial del cultivo en el terreno.



Otra de las variables a tener en cuenta es la topografía, la geometría, la orientación del cultivo y la localización del terreno. Para que la flota de robots pueda desplazarse correctamente por el campo es necesario conocer estas características, además de utilizar sistemas sensoriales adecuados para el guiado de los robots.

Además de las dos variables mencionadas anteriormente, una de las variables más influyentes en la gestión de las malas hierbas es la propia distribución espacial de éstas en el campo de cultivo. Es necesario poder representar de forma realista un campo de cultivo infectado por malas hierbas para que así las técnicas de gestión que simulen la eliminación de la infestación tengan sentido. A continuación se presentan algunos trabajos de investigación donde se estudian y caracterizan algunas distribuciones espaciales de malas hierbas.

Los altos costos asociados al uso de herbicidas han inducido a evaluar el uso de éstos sobre todo el campo conociendo que las malas hierbas no se encuentran distribuidas uniformemente sobre el campo de cultivo, ni tampoco se distribuyen mediante un patrón aleatoriamente uniforme, contrario a lo que las técnicas tradicionales de gestión de malas hierbas suponen (Thornton et al. 1990).

En un trabajo de investigación realizado por Johnson et al. (1996), en un campo de cultivo (*soybean* y *corn*) al este de Nebraska entre los años 1992 y 1993, se realizaron mediciones de la densidad de malas hierbas (*velvetleaf* y *sunflowers*). En este estudio determinaron que en más del 40% de las zonas observadas se encontraban totalmente libres de malas hierbas del tipo *velvetleaf*, y en más del 80% para el tipo *sunflowers*. En las zonas restantes era posible encontrar diferentes densidades de malas hierbas. Este tipo de observación ha guiado a varios autores a estudiar con mayor detalle la distribución espacial de las malas hierbas para poder generar modelos más precisos enfocados tanto a estudios económicos asociados al rendimiento del terreno, como a la gestión precisa de malas hierbas.

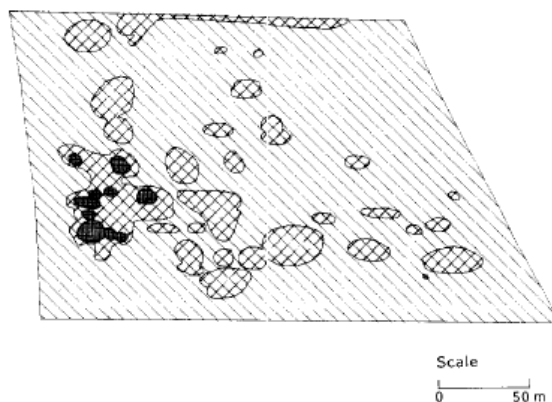
Cardina et al. (1997) presentan patrones característicos de dos especies diferentes de malas hierbas, una de hoja ancha (*broadleaf*) y otra de gramínea (*grass*), descritos mediante estadísticas poblacionales, semivariogramas (funciones básicas que describen la variabilidad espacial de un fenómeno) y mapas del tipo *Kriging* (métodos geoestadísticos de interpolación). En todos los casos presentados las malas hierbas exhiben algunos niveles de agrupación, pero no se encontró ninguna especie que exhiba de manera consistente un patrón en particular. Después de analizar la distribución espacial de distintas malas hierbas en maíz y soja, en la zona de Ohio,

Nebraska, ocasionalmente es posible encontrar una alta densidad de malas hierbas en los bordes del campo de cultivo, lo cual sugiere una invasión por efectos de borde. Además, es posible encontrar que un tipo de mala hierba se encuentra agrupada en una zona del campo de cultivo, mientras que otro tipo diferente de mala hierba se encuentra agrupado en otra parte del campo de cultivo, y ambas especies no se encuentran superpuestas.

Thornton et al. (1990) realizaron estudios de cómo la distribución espacial de las malas hierbas puede afectar substancialmente el cálculo del umbral económico. El umbral económico indica en qué punto el uso de químicos trae beneficios al agricultor con respecto a cuánto se mejora el rendimiento del cultivo. Dicho umbral depende de:

1. Una función de pérdida de cultivo, la cual relaciona la reducción del rendimiento del cultivo con la densidad de malas hierbas;
2. Una función de respuesta que relaciona la aplicación del herbicida con el rendimiento del cultivo;
3. Una función de respuesta que relaciona la aplicación del herbicida con la subsiguiente densidad de malas hierbas;
4. El rendimiento del cultivo;
5. Los precios esperados y costes de tratamiento;
6. La carga estimada de malas hierbas.

En tal sentido, Thornton et al. (1990) definieron una forma de modelar las malas hierbas para estudiar dicho umbral económico, la cual se basa en que la distribución espacial de éstas no es homogénea sobre todo el campo de cultivo. Esto genera que, si una población en particular de malas hierbas se encuentra concentrada en un área pequeña del campo, el umbral económico crece, y por lo tanto, la aplicación química se vuelve menos dominante en la estrategia económica. Para este estudio, se usaron diferentes modelos de distribución espacial de las malas hierbas. En uno de ellos, el campo fue dividido en cuadrados o *quadrats* y la densidad de las malas hierbas dentro de cada cuadrado permanecía constante, es decir, que era posible encontrar cuadrados sin malas hierbas o cuadrados con una única densidad de malas hierbas. El otro modelo utiliza una distribución de probabilidad uniforme con el objetivo de representar la densidad de malas hierbas en cada cuadrado, lo cual permite que existan diferentes niveles de densidad de malas hierbas en diferentes parches.



**Fig. 2-4. Mapa digitalizado de un campo de trigo en Boghall Farm, Mid-Lothian, U.K., el cual presenta la distribución de malas hierbas (*wild oats*) en términos de dos niveles de infestación: sin malas hierbas (líneas diagonales paralelas); baja densidad de malas hierbas (líneas diagonales perpendiculares); alta densidad de malas hierbas (zonas oscuras). Figura extraída del trabajo realizado por Thornton et al. (1990)**

Con el estudio realizado, Thornton et al. (1990) determinaron que el modelar la distribución de las malas hierbas mediante parches tiene mayor importancia en el cálculo del umbral económico que utilizando los métodos actuales de probabilidad de distribución de malas hierbas. Además de esto, lograron obtener imágenes de un campo de cultivo mediante un globo de helio de baja altitud y un sistema fotográfico de 35 mm con el objetivo de estimar el área afectada en el campo de cultivo, además de estimar la densidad de malas hierbas dentro de los parches típicos (véase la Fig. 2-4). Se logró determinar dos niveles diferentes de infestación, una de baja densidad (zonas claras) y otro de alta densidad (zonas oscuras), además de las zonas libres de malas hierbas.

En resumen, el conocimiento de la variabilidad espacial de la población de malas hierbas sobre el campo de cultivo ofrece un gran potencial para el control preciso utilizando menos productos químicos, lo que resulta en la reducción de residuos tanto para el medio ambiente como para los alimentos cultivados (Oerke et al. 2010). Las técnicas existentes de medida de la distribución espacial de las malas hierbas no son suficientes para la obtención precisa de mapas de infestación. Lo que se sabe y se ha observado es que las malas hierbas se distribuyen de forma heterogénea, tanto espacial como temporal. Lo que normalmente se encuentra en un campo de cultivo son conjuntos de parches de diferentes tamaños, o en franjas a lo largo de la dirección de cultivación (Marshall 1988; R. Gerhards y Christensen 2003; Christensen y Heisel 1998). Esto se

puede observar en la Fig. 2-4, la cual ayuda a entender de una manera gráfica cómo es posible encontrar un campo de cultivo infectado por malas hierbas. En base a estas informaciones, en el apartado 3.2.3 se presenta un modelo que se ha desarrollado con el objetivo de generar un conjunto de parches de malas hierbas que representarán una infestación realista en un campo de cultivo.

## **2.4 Simuladores aplicados a la agricultura**

En el transcurso del desarrollo de este trabajo se realizó la investigación necesaria sobre sistemas de simulación comúnmente utilizados en la agricultura. Más aún, ya que el enfoque de este trabajo es el desarrollo de un entorno computacional para la simulación de flotas de robots los cuales sean capaces de ejecutar tareas de agricultura de precisión, la búsqueda de simuladores se centró justo en esta área.

En la industria agrícola existen varios sistemas de simulación. La mayoría de ellos se enfocan en la simulación de diferentes tipos de gestiones sobre el terreno, ya sea cómo un tipo de cultivo afecta al rendimiento de un terreno, conociendo las características propias del suelo y el agua de ese terreno. Por ejemplo, el simulador APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*) para sistemas de producción agrícola es un entorno informático que permite analizar complejos sistemas agrícolas, que incluyen secuencias y rotaciones de cultivos y pastos, y considera la planificación de diferentes estrategias (McCown et al. 1996; Keating et al. 2003). Este sistema permite que el usuario comprenda de una mejor manera el impacto del clima, el tipo de suelo, y el tipo de gestión sobre la producción del cultivo y del pasto. Es una herramienta para la exploración de adaptaciones agronómicas tales como cambios en la planificación de las fechas, tipos de cultivo, gestión de fertilización/irrigación, etc.

Los modelos de simulación de cultivos APSIM comparten los mismos módulos para la simulación del suelo, agua y balances en el nitrógeno. Tiene la habilidad de integrar modelos derivados de esfuerzos de investigación fragmentados. Esto permite que la investigación de una disciplina o dominio sea transportada para el beneficio de otra disciplina o modelo. Además, facilita la comparación de modelos o sub-modelos en una plataforma en común. El usuario es capaz de configurar un modelo eligiendo un grupo de sub-modelos de un conjunto de módulos de cultivos, suelos y utilidades. APSIM puede simular más de 20 tipos de plantaciones, y las

salidas generadas pueden usarse para estudios espaciales vinculándolas con sistemas de información geográficos o GIS (*Geografic Information Systems*).

Otro sistema de simulación para modelos de cultivo similar al sistema APSIM es CropSys (*cropping systems simulation model*), que es un sistema empleado como herramienta analítica para estudiar el efecto del clima, el suelo y la gestión en sistemas de producción agrícola y el medio ambiente (Stöckle et al. 2003). Este sistema simula el agua y el nitrógeno del suelo, el desarrollo y crecimiento del cultivo, el rendimiento del cultivo, producción y descomposición de residuos, erosión del suelo por agua, y salinidad. Además, permite realizar simulaciones de cultivos por año o para varios años y rotaciones de cultivos mediante un conjunto de parámetros.

Existen otros modelos de simulación de cultivos parecidos a los anteriormente mencionados, como DSSAT (Thorp et al. 2008), SUCROS (Goudriaan y Van Laar 1994) y FARMSCAPE (Carberry et al. 2002) entre otros, donde es posible evaluar el efecto del suelo, el clima y el agua sobre la producción agrícola. Estos tipos de simuladores comentados anteriormente son muy interesantes a la hora de la realización de una planificación eficiente de la gestión sobre un campo de cultivo, aunque las salidas otorgadas por éstos son resultados numéricos los cuales pueden ser complicados de entender para una persona que no esté acostumbrada a trabajar con ellos. En tal sentido, en este trabajo se ha pretendido el desarrollo de un entorno que permite visualizar en un mundo en 3D la ejecución de misiones de una flota de robots en la realización de tareas agrícolas, con el fin de ayudar a un mejor entendimiento del uso de sistemas autónomos en la agricultura.

## **2.5 Simuladores de flotas de robots**

En la actualidad existe una gran cantidad de herramientas que permiten realizar simulaciones en tres dimensiones (3D) con un enfoque hacia flota de robots. Es posible encontrar aplicaciones de software libre tales como Gazebo (Gerkey et al. 2001; Vaughan et al. 2003; Gerkey et al. 2003), Blender for Robotics (Bruyninckx 2004), Ipzrobots (Martius y Der 2007), Simbad (Hugues y Bredeche 2006), entre otros. Estas aplicaciones permiten la simulación de poblaciones de robots, sensores y objetos, en un ambiente en 3D. Los sensores que se encuentran en estas aplicaciones son capaces de generar una realimentación entre la interacción del robot

con el entorno, el cual debe ser creado también por el usuario. Además, la interacción entre los objetos creados se realiza mediante modelado, teniendo en cuenta la física del sólido rígido.

Conjuntamente con las aplicaciones mencionadas anteriormente, es posible encontrar simuladores de robots comerciales los cuales presentan las mismas características que las aplicaciones de software libre y permiten realizar las mismas tareas. Estos simuladores, tales como V-REP (Freese et al. 2010), Microsoft Robotics Developer Studio (Johns y Taylor 2008), Webots (Michel 2004), entre otros, también permiten la simulación de sensores y actuadores utilizados normalmente en robots, permiten la creación y evaluación rápida de cualquier diseño, además de que es posible visualizar la simulación en un mundo en 3D.

Algunas de estas aplicaciones utilizan interfaces gráficas para la construcción de los robots y el ambiente en el cual interactúan, y todas admiten diferentes lenguajes para la programación de los controladores, tales como PYTHON, Java, C++, entre otros.

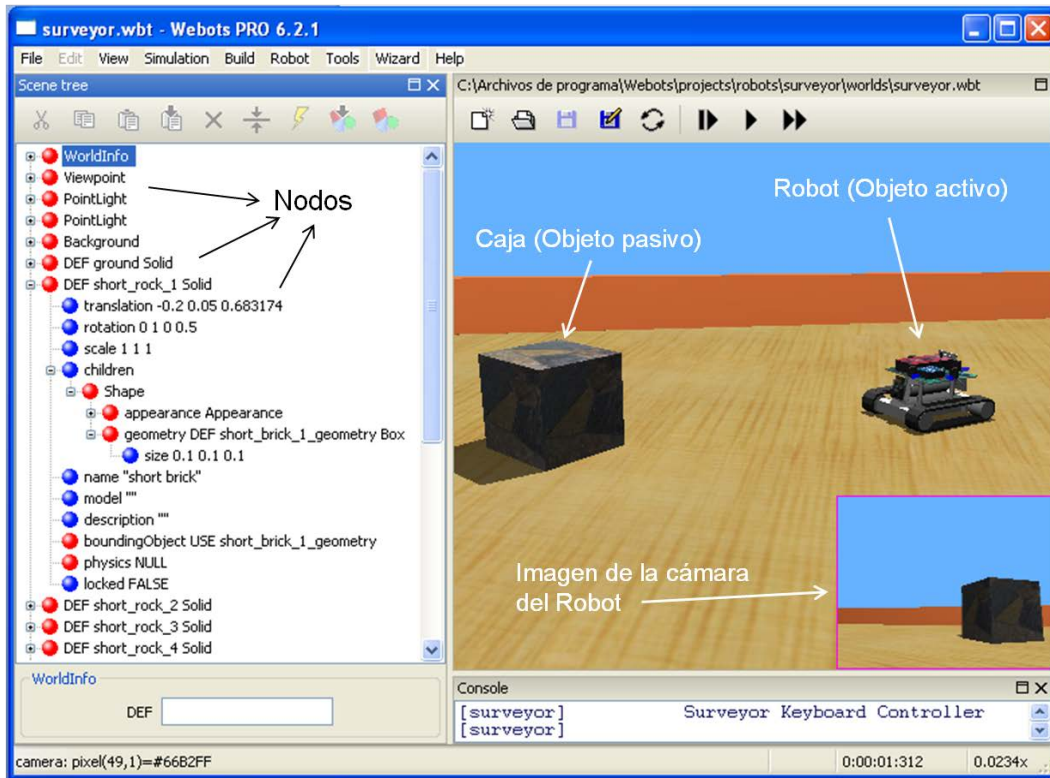
Sobre la amplia gama de simuladores disponibles se ha decidido utilizar la aplicación Webots, ya que la compañía que la comercializa, *Cyberbotics Ltd.* (Cyberbotics 2010), forma parte del consorcio del proyecto RHEA.

### **2.5.1 Webots**

La herramienta Webots es un paquete de *software* profesional para la simulación de robots móviles. Esta herramienta ofrece un entorno de prototipado rápido, que permite al usuario crear mundos virtuales en 3D compuesto por elementos con propiedades físicas como masa, inercias, coeficientes de fricción, etc. El usuario puede añadir objetos pasivos simples u objetos activos llamados robots móviles. Estos robots pueden tener diferentes esquemas de movimiento (robots con ruedas, robots con patas o robots voladores).

Por otra parte, los robots pueden ser equipados con un amplio número de sensores y actuadores, tales como sensores de distancia, ruedas motrices, cámaras, servomotores, sensores de contacto y fuerza, emisores y receptores de señales de radiofrecuencia, etc. Finalmente, el usuario es capaz de programar cada robot individualmente para que exhiba el comportamiento deseado.

La herramienta Webots permite al usuario incorporar en el mundo virtual robots móviles (con ruedas o con patas) y un robot “Supervisor”. El “Supervisor” es un tipo privilegiado de robot que puede ejecutar operaciones que normalmente solo pueden llevarse a cabo por un



**Fig. 2-5. Interfaz Gráfica de Usuario de Webots**

operador humano y no por un robot real. Este robot es capaz de controlar tanto al mundo virtual como a los robots presentes en él. Por conveniencia, se representa como un robot sin ruedas, manejado por un controlador con capacidades extendidas el cual supervisa todo el universo de simulación.

El controlador supervisor es un caso particular de controlador de robots, el cual es capaz de controlar el proceso de simulación y todas las propiedades de los diferentes objetos que conforman el mundo de simulación. Con este controlador se puede modificar la posición y orientación de los objetos en el mundo de simulación, además de variar sus propiedades de apariencia, geometría, etc. En tal sentido, este robot permite al usuario realizar cambios sobre los objetos que conforman el mundo virtual mientras se ejecuta la simulación.

Los objetos mencionados anteriormente (objetos pasivos o activos como los robots) son llamados “Nodos” dentro de la interfaz de programación de Webots (véase la Fig. 2-5). Estos “Nodos” son descritos utilizando el lenguaje denominado *Virtual Reality Modeling Language* (VRML), que simplemente es un formato de intercambio en 3D (Carson et al. 1999). Este lenguaje define las semánticas comúnmente utilizadas en las aplicaciones de 3D hoy en día, tales

como transformaciones jerárquicas, fuentes de luz, puntos de vista, geometrías, animaciones, niebla, propiedades de los materiales y asignación de texturas.

Otra característica de Webots es que el usuario puede definir nuevos “Nodos” incorporando características de otros “Nodos” ya existentes y definidos mediante el lenguaje VRML. Estos “Nodos” especializados se denominan “Prototipos” y pueden insertarse en el “Árbol de Nodos” (*Scene Tree*, véase la Fig. 2-5) de Webots. Los “Prototipos” son archivos de extensión .proto los cuales son capaces de crear figuras complejas en 3D y ser incorporados como simples “Nodos”. Estos archivos deben generarse manualmente ya que dentro de la interfaz de usuario de Webots no es posible hacerlo.

### **2.5.2 Lenguaje VRML**

Como se ha mencionado anteriormente, VRML es un lenguaje de descripción de escenas en el que cada escena se compone de un número de objetos. Los objetos pueden ser formas sólidas situadas y orientadas de determinada forma o elementos intangibles que afectan a la escena como luces, sonido y distintos puntos de vista. Para crear estos mundos de realidad virtual se utilizan ficheros de texto, cuya extensión será siempre .wrl, los cuales pueden ser creados mediante cualquier editor o procesador de textos. Además, existe la posibilidad de utilizar programas de diseño gráfico, los cuales generan automáticamente ficheros en formato VRML, que en nuestro caso es la herramienta Webots.

Los objetos que conforman la escena en el lenguaje VRML se encuentran compuestos por uno o varios nodos. Un nodo es la estructura mínima indivisible de un fichero VRML y tiene como misión la de definir las características de un objeto o bien las relaciones entre distintos objetos. La mayoría de los nodos pueden repetirse tantas veces como sea necesario en una escena, salvo una serie de nodos especiales como los que definen la niebla o la panorámica del mundo virtual que aparecen una única vez.

Por otra parte, no todos los nodos afectan al aspecto visual del mundo. Por ejemplo, existen nodos que actúan como sensores que detectan acciones del usuario e informan de ellas a otros objetos y otros nodos que se encargan de modelar los sonidos.

Los nodos a su vez contienen campos que describen propiedades. Todo campo posee un tipo determinado y no se puede inicializar con valores de otro tipo. De este modo, cada tipo de

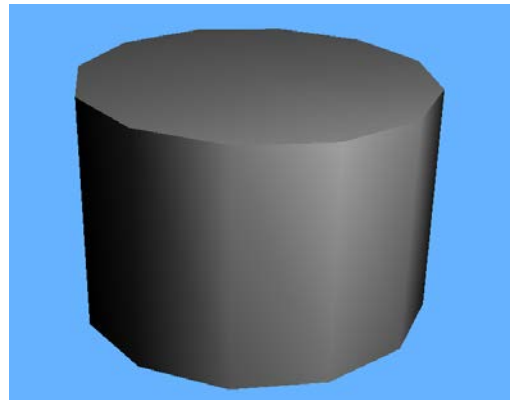


```

#VRML V2.0 utf8
#Esto es una línea de comentarios
Transform{
  Translation 0 0 0.1
  Rotation 0 1 0 0
  Scale 1 1 1
  Children [
    Shape{
      appearance Appearance{
        material Material{}
      }
      geometry Cylinder{
        height 2.0
        radius 1.5
      }
    }
  ]
}

```

a)



b)

**Fig. 2-6. Ejemplo de programación del lenguaje VRML. a) Código para la generación de un cilindro. b) Generación del cilindro utilizando la herramienta Webots**

nodo tiene una serie de valores predeterminados para todos sus campos, de forma que cuando se utilice en una escena sólo se deben indicar aquellos campos que se quieran modificar.

Los campos pueden ser simples, o bien indicando a vectores u otros nodos. En la Fig. 2-6 se presenta un ejemplo de programa VRML el cual contiene un nodo del tipo *Transform* (transformación) que define el sistema de coordenadas de sus hijos con respecto al sistema de coordenadas del padre. Este nodo contiene tres campos: uno de translación (*translation*) con respecto al nodo padre, uno de rotación (*rotation*) con respecto a sus ejes, y uno de escala (*scale*). Como hijo del nodo *Transform* se tiene el nodo *Shape* (forma), que genera formas tridimensionales en el mundo virtual. Este nodo contiene dos campos: uno de nombre *appearance* (apariencia) el cual define el color y texturas de dicha forma, y otro de nombre *geometry* (geometría), que puede ser una figura geométrica simple (caja, cono, cilindro, etc.) o una extrusión.

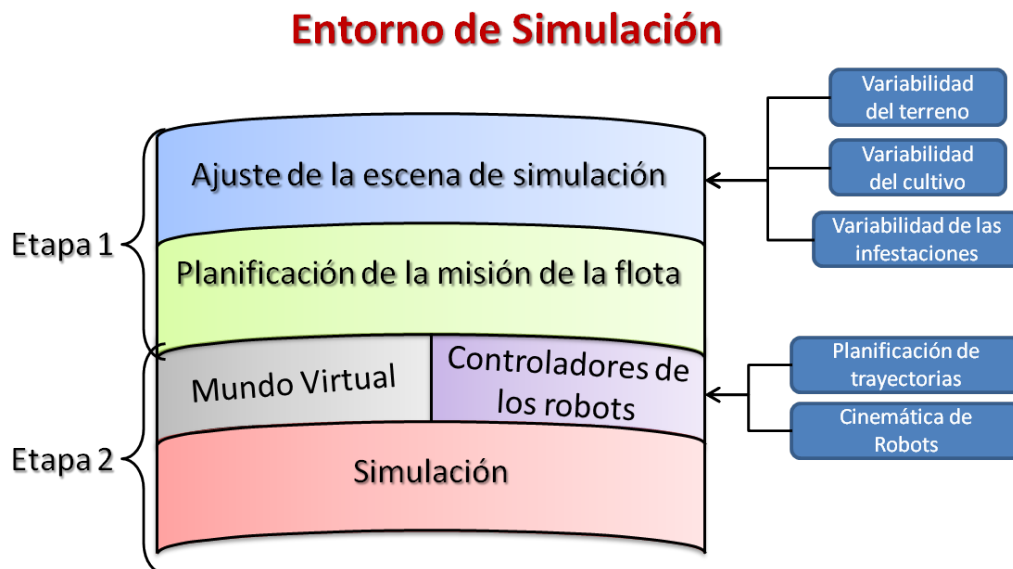


## Capítulo 3 - Simulador para flota de robots en agricultura de precisión

### 3.1 Introducción

Utilizando como base la herramienta computacional Webots se ha desarrollado un entorno de simulación para flotas de robots aplicado a la agricultura (Emmi et al. 2010). Este entorno se encuentra conformado por un mundo virtual en 3D que contiene un campo de cultivo y un conjunto de unidades móviles, tanto aéreas como terrestres, las cuales son capaces de representar la ejecución de tareas de precisión agrícola mediante simulaciones. El campo de cultivo virtual puede configurarse para representar las características deseadas por el usuario, tales como topografía, dimensiones, tipo de cultivo e infestación mediante malas hierbas. El usuario podrá equipar, con diversos sensores y actuadores, a las unidades móviles para la simulación de tareas agrícolas, además de programar los algoritmos de control que las gobiernen, específicamente para la gestión precisa de malas hierbas mediante la cooperación de diferentes tipos de robots.

En la Fig. 3-1 se presenta la estructura general de configuración del entorno de simulación desarrollado. La configuración del entorno se ha dividido en dos etapas principales, ya que la información generada en la primera etapa se utiliza por la Interfaz Gráfica para la



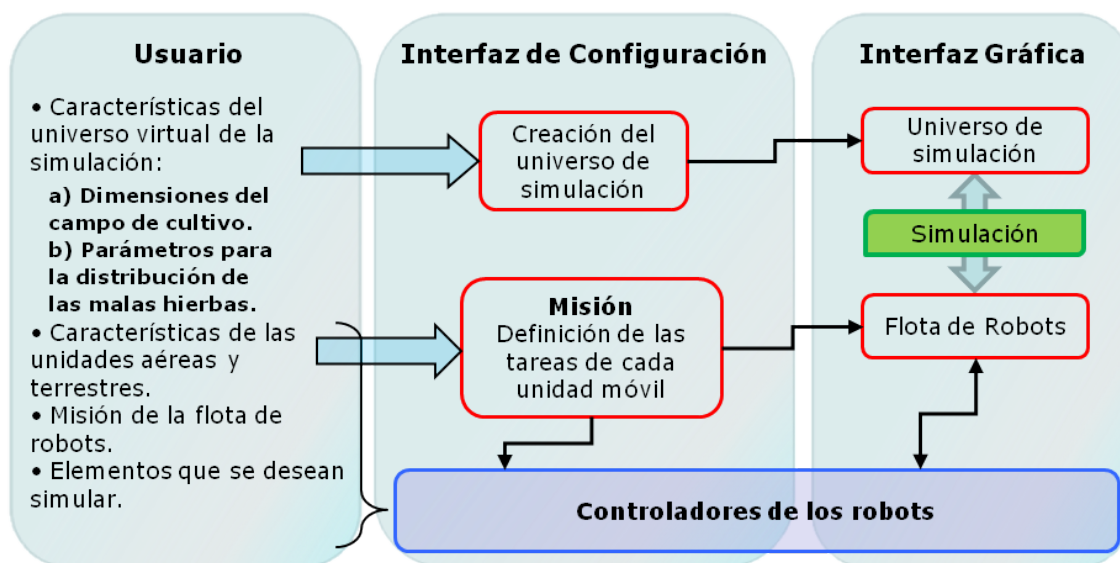
**Fig. 3-1. Estructura general de configuración del entorno de simulación**

generación del mundo virtual y sus elementos. Ambas etapas se enumeran a continuación:

**Etapla 1:** etapa de **configuración del universo virtual de simulación**, donde el usuario precisa las diferentes variabilidades que definen al campo de cultivo, además de determinar la misión de la flota de robots. Esta misión se encuentra conformada por una serie de tareas las cuales serán distribuidas tanto a las unidades aéreas como a las unidades terrestres, cuya ejecución será simulada. En la misión se indica, por ejemplo, cuántas unidades aéreas y terrestres van a realizar la gestión de malas hierbas, qué tipo de gestión va a realizar, qué trayectorias va a tomar cada robot sobre el campo de cultivo, etc.

**Etapla 2:** etapa de **programación de los controladores** de la flota de robots y **simulación**. En esta etapa, una vez definida la conformación de la flota y las tareas a realizar, se programan los algoritmos necesarios para la simulación de estas tareas.

El entorno de simulación se encuentra compuesto por dos interfaces que interactúan entre sí para la configuración del terreno agrícola y la visualización de la simulación. La primera interfaz, denominada Interfaz de Configuración de Usuario o C UI (*Configuration User Interface*), se ha desarrollado en base a la herramienta computacional Matlab, la cual permite configurar las características del campo de cultivo, definir la misión que se desea ejecutar en la simulación y modificar diferentes parámetros de la misma. La segunda interfaz ha sido denominada Interfaz Gráfica de Usuario o GUI (*Graphical User Interface*), donde es posible



**Fig. 3-2. Estructura de la interacción Usuario – Interfaz de Configuración – Interfaz Gráfica, del entorno de simulación**

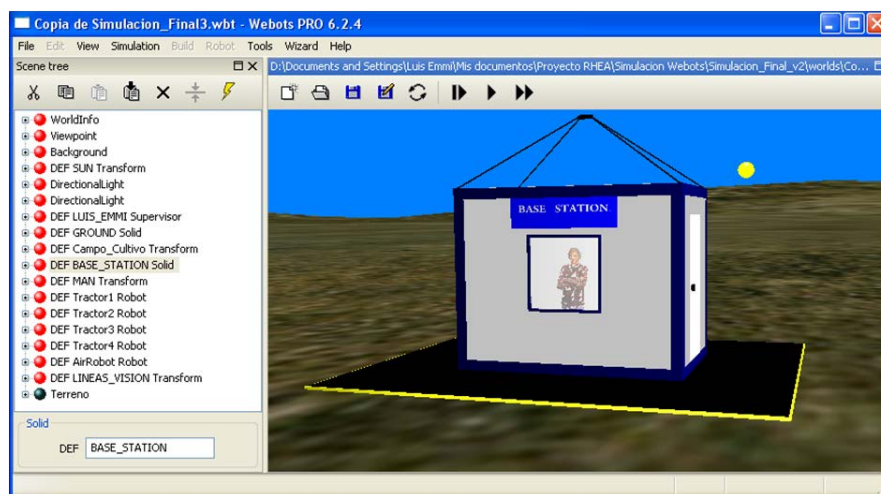
observar y modificar el mundo virtual y ejecutar la simulación. Se utiliza la Interfaz Gráfica de la herramienta computacional Webots como la GUI del entorno de simulación desarrollado. Además, Webots se utiliza como herramienta de simulación de robots. En la Fig. 3-2 se presenta un diagrama general de la interacción de las interfaces que componen el entorno de simulación desarrollado.

El propósito de este entorno es permitir que el usuario pueda realizar pruebas sobre diferentes algoritmos para la gestión de malas hierbas, sobre diferentes cultivos, utilizando diferentes métodos de acción (mecánicos y/o químicos). Además de lo indicado anteriormente, este entorno permite que el usuario realice cambios en la geometría y configuración de las unidades aéreas y terrestres que conforman la flota del proyecto RHEA, ya sea añadiendo sensores, actuadores, modificando dimensiones, incorporando nuevos sistemas de actuación para la gestión de malas hierbas e introduciendo más robots en el universo de simulación.

En las siguientes secciones se detalla la conformación de la Interfaz de Configuración para la creación del universo de simulación, además de la composición de la flota de robots, los diferentes sensores y actuadores que se pueden incorporar en las unidades móviles, y por último se presenta el diseño de algoritmos de control para la generación de un ejemplo de simulación sobre la gestión química de malas hierbas.

### 3.2 Creación del Universo de Simulación

El entorno de simulación contiene predefinido un universo virtual que consta de un



**Fig. 3-3. Base del universo de simulación presentada en Interfaz Gráfica de Usuario**

terreno amplio, con montañas en la lejanía y el sol en el horizonte (véase la Fig. 3-3). En el centro del terreno virtual se encuentra el campo de cultivo, una estación base y la flota de robots. Mediante el uso de la Interfaz de Configuración el usuario introduce los diferentes parámetros para la generación del campo de cultivo, para así poder ser representado en el mundo virtual en 3D mediante la Interfaz Gráfica. Se determinó que para este entorno de simulación se tendrían en cuenta tres variabilidades importantes, las cuales son:

1. La topografía y texturas del terreno.
2. El tipo de cultivo.
3. La infestación por malas hierbas.

A continuación se presenta en detalle cómo el usuario puede configurar estas variabilidades, mediante el uso de la Interfaz de Configuración.

### ***3.2.1 Configuración de la topografía del terreno***

La topografía y las texturas del terreno pueden tener un impacto importante en la ejecución de las tareas planificadas para la flota de robots. Puede que sea necesario el conocimiento de las elevaciones y los desniveles en el campo de cultivo para evaluar el desplazamiento tanto de las unidades aéreas como de las unidades terrestres. En tal sentido, este entorno de simulación permite la configuración de las texturas del terreno para que se asemejen a la topografía de un área real. Para el nivel de desarrollo de este entorno de simulación se utilizó una aplicación denominada *Terrain Generator for Webots* (2010), provista por la misma compañía que comercializa la herramienta de simulación de robots *Cyberbotics Ltd.* (Cyberbotics 2010), la cual permite obtener mediante el uso de Google Maps y GeoNames (2010), texturas del terreno para la aplicación Webots.

Utilizando un navegador y accediendo a la herramienta *Terrain Generator for Webots*, es posible definir un área en el mundo para obtener su textura mediante la base de datos GeoNames. Una vez generado un archivo que contiene la información necesaria, se debe acondicionar esta información para generar otro archivo diferente, del tipo “Prototipo”, para que sea compatible con el universo virtual. Para el acondicionamiento de la información se utiliza la Interfaz de Configuración del entorno de simulación, donde el usuario debe indicar el nombre del archivo, el punto medio de elevación, las dimensiones del terreno obtenido y la orientación del campo de cultivo contenido en el terreno que se está representando.

El ajuste preciso del terreno representado mediante texturas reales y el campo de cultivo generado posteriormente, debe realizarse utilizando la Interfaz Gráfica del entorno de simulación. Mediante la Interfaz Gráfica se podrán ajustar las elevaciones de los diferentes elementos que componen el mundo virtual para así adecuarse a las texturas que se están incorporando.

### **3.2.2 Configuración del cultivo**

El campo se encuentra conformado por una serie de surcos donde se planta el cultivo. La dirección y sentido de los surcos puede ser definida por el usuario si se ha generado la topografía del terreno virtual en base a uno real utilizando la herramienta indicada en el apartado 3.2.1. Si no se definió ninguna topografía específica, la Interfaz de Configuración define la dirección de las líneas de cultivo según ciertos parámetros ya predeterminados.

La colocación de cada planta obedece a una serie de parámetros que dependen del tipo de cultivo que se siembra. Estos parámetros conforman el denominado “Marco de Plantación”, que simplemente expresa la distancia entre las plantas de una misma fila y la de las filas adyacentes. Por tal motivo, la generación del campo de cultivo depende del marco de plantación, que es el parámetro que el usuario define como características de dicho campo.

Para generar una sensación de realismo en el campo de cultivo virtual, las plantas de una columna no mantienen una distancia constante entre las plantas de la columna adyacente, sino que se añade una pequeña dispersión entre ellas para generar un efecto natural en el campo de cultivo. Para generar esta dispersión, primero se determina la posición de las plantas según los parámetros del “Marco de Plantación”, y luego se añade una pequeña perturbación aleatoria a la posición de cada planta con respecto a las plantas que se encuentran en las columnas adyacentes. En tal sentido, se diseñó un algoritmo para definir la posición de cada planta siguiendo este modelo, que se presenta a continuación:

*Algoritmo para poblar el campo de cultivo:*

*inicio*

*Constante Z: valor medio de la distancia entre plantas de filas adyacentes*

*Constante X: valor medio de la distancia entre plantas de la misma fila*

*Constante  $\sigma$ : varianza de la variable Z*

*repetir*

*Se genera un número aleatorio siguiendo una distribución de probabilidad normal de media 0 y varianza  $\sigma$*

*Coordenada Siguiente Z = Coordenada Previa Z + Z + número aleatorio*

*Coordenada Siguiente X = Coordenada Previa X + X*  
*Se asignan las coordenadas generadas a la posición de la planta*  
*hasta – que el campo se encuentre poblado por completo*  
*fin*

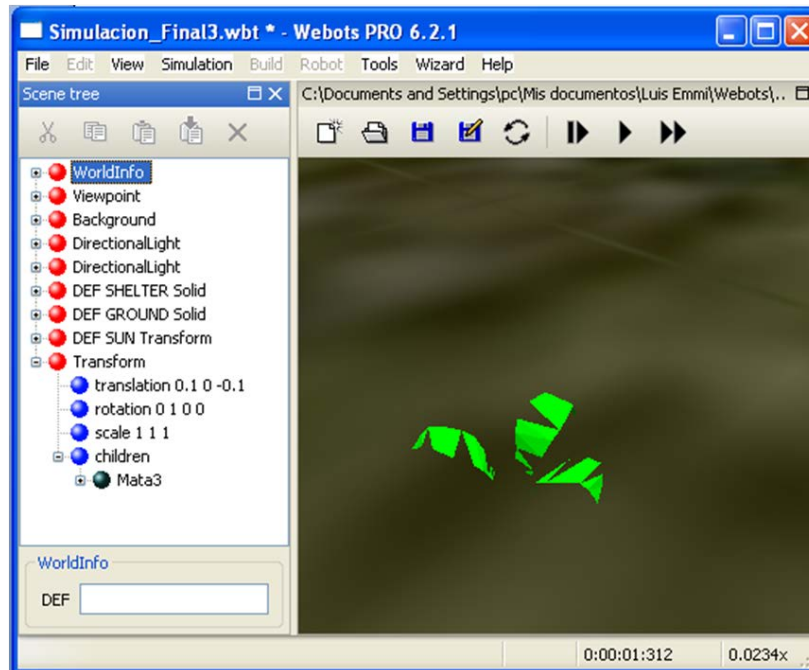
Como ejemplo de la generación de las coordenadas de las plantas se presenta un extracto del código de la Interfaz de Programación para la generación del universo de simulación, donde se ha programado el algoritmo diseñado:

```
%%% Interfaz para la creación del Universo de Simulación %%%
%% Generación de las Coordenadas de las plantas %%
% Parámetros de configuración:
% Marco de Plantación (Línea simple)
a = 0.9;      % Distancia entre plantas de diferentes columnas
b = 0.35;     % Distancia entre plantas de una misma columna
p = 0.05;     % Parámetro de dispersión.
h = a - 2*p;  % Ancho efectivo
% Tamaño de la malla (Número de plantas)
N = 100;      % Filas
M = 30;       % Columnas
% Dimensiones del Campo
Largo_Campo = N * b; % X
Ancho_Campo = M * a; % Z
% Se generan las coordenadas en X que no tienen perturbación.
coordx(1) = -(Largo_Campo/2);
for j=1:N-1
    coordx(j+1) = coordx(j) + b;
end
% Se generan las coordenadas en Z preliminares sin perturbación
for j=1:N
    coordz(1,j) = -(Ancho_Campo/2);
    for i=1:M-1
        coordz(i+1,j) = coordz(i,j) + a;
    end
end
% Se añade una pequeña perturbación a las coordenadas Z de cada planta
for j=1:N
    for i=1:M
        coordz(i,j) = coordz(i,j) + normrnd(0,p);
    end
end
end
```

La perturbación añadida a las coordenadas Z de las plantas se genera utilizando la función de Matlab *normrnd*( $\mu, \sigma$ ), la cual retorna un número aleatorio elegido de una distribución normal de media  $\mu$  y de varianza  $\sigma$ .

Una vez obtenidas las coordenadas X-Z de las plantas, se procede a incorporar cada una de ellas en el universo de simulación. Para lograr esto, primero se descargó de internet un modelo de una planta en 3D (ORC Incorporated 2010), que se modificó ligeramente y se creó un





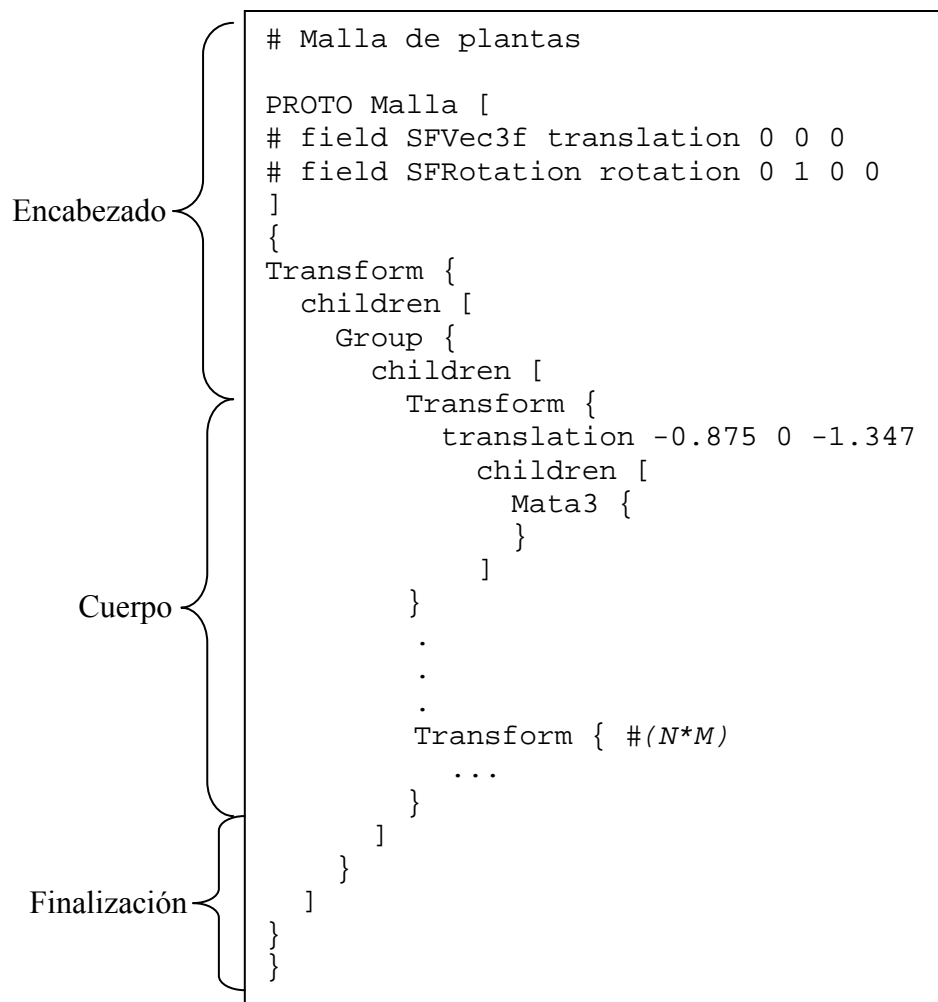
**Fig. 3-4. Ejemplo de la generación del campo de cultivo. Planta utilizada para poblar el campo de cultivo representada en la Interfaz Gráfica**

“Prototipo”, llamado “Mata3.proto”. Este prototipo genera una planta en 3D cuando es incorporado como un nodo dentro de Webots (véase la Fig. 3-4).

Para ubicar cada una de las plantas en las coordenadas correctas dentro del universo de simulación, se utiliza el nodo *Transform* (Transformación), el cual es un nodo de agrupación que define el sistema de coordenadas de sus nodos hijos, relativo al sistema de coordenadas del universo de simulación. Por lo tanto, el campo de cultivo se encuentra conformado por  $N \times M$  nodos del tipo *Transform*, donde en su campo *Translation* (Traslación) se introduce cada una de las coordenadas generadas según el modelo diseñado, y en el campo hijos se introducen los “Prototipos” de la planta a utilizar. Esto genera un nuevo archivo del tipo “Prototipo”, llamado “Malla”, el cual genera una malla de plantas en el universo virtual de simulación.

Para la generación de este archivo “Prototipo” es necesaria la manipulación de archivos de texto basados en código ASCII, por lo que se utiliza la Interfaz de Configuración para la generación de dichos archivos.

El archivo “Malla.proto” se encuentra conformado por tres estructuras principales: el encabezado, el cuerpo y la finalización del archivo. El encabezado y la finalización de este tipo de archivo deben generarse con una estructura definida para que la aplicación Webots pueda



**Fig. 3-5. Estructura del archivo “Malla.proto” para la ubicación de cada una de las plantas en el campo de cultivo virtual**

interpretarlo de manera correctamente. Por otro lado, en el cuerpo del archivo se encuentra el conjunto de nodos del tipo *Transform* que ubican cada planta en el universo. En la Fig. 3-5 se puede observar un ejemplo de dicho archivo “Prototipo” para ilustrar su estructura.

En la Fig. 3-6 se presenta un extracto de código de la Interfaz de Configuración que se utiliza para la generación del archivo “Malla.proto”. En este extracto se puede observar cómo se generan las tres estructuras que conforman al archivo “Prototipo” en cuestión. Las funciones *fopen()* y *fprintf()* son funciones de Matlab, donde la primera crea un archivo de texto y la segunda escribe en el archivo la información dada. Se requiere además, que los archivos “.proto” tengan un encabezado específico para ser leídos correctamente por Webots; esto se hace mediante la función *encabezado()*.

```

%% Generación del campo de cultivo
fid = fopen('Malla.proto'); % Se crea un archivo con el nombre dado.
fid = encabezado(fid);      % Se genera el encabezado del archivo.
% Se escribe el conjunto de nodos del tipo Transformación que componen el
% "Prototipo".
for j=1:N
    for i=1:M
        fid = planta(fid,coordx(j),coordz(i,j));
    end
end
fid = final(fid);           % Se cierra el archivo.

```

a)

```

function [fid] = encabezado (fid)
fprintf(fid,'# Malla de tomate\n\n');
fprintf(fid,'PROTO Malla [\n');
fprintf(fid,'# field SFVec3f translation 0 0 0\n');
fprintf(fid,'# field SFRotation rotation 0 1 0 0\n');
fprintf(fid,']\n');
fprintf(fid,'{\n');
fprintf(fid,'Transform {\n');
fprintf(fid,'children [\n');
fprintf(fid,'Group {\n');
fprintf(fid,'children [\n');
end

```

b)

```

function [fid] = planta(fid,x,z)
fprintf(fid,'Transform {\n');
fprintf(fid,'translation %0.3f 0 %0.3f\n',x,z);
fprintf(fid,'children [\n');
fprintf(fid,'Mata3 {\n');
fprintf(fid,'}\n');
fprintf(fid,']\n');
fprintf(fid,'}\n');

```

c)

**Fig. 3-6. Extracto de código de la Interfaz de Configuración para la generación del campo de cultivo. a) Estructura para la creación del archivo “Prototipo”. b) Extracto de código para la generación del encabezado del archivo. c) Extracto de código para la ubicación de cada planta utilizando el nodo “Transformación”**

### 3.2.3 Configuración de la infestación por malas hierbas

Según la investigación realizada en el apartado 2.3, y tras analizar algunos modelos, mapas y estudios de la distribución espacial de las malas hierbas en los campos de cultivo, independientemente del tipo de cultivo y de la especie de la mala hierba que pueda afectar al cultivo, se encontró una manera de representar de forma realista la distribución espacial de éstas mediante un modelo matemático sencillo. La idea es representar un grupo de parches dentro del

campo de cultivo, los cuales contienen una cantidad aleatoria de malas hierbas. La forma de estos parches ha sido seleccionada siguiendo una función de distribución del tipo Gaussiana. Con esta función se busca generar parches donde en su centro existe una alta concentración de malas hierbas, para luego esparcirse en base a ese centro. Esto genera zonas con diferentes densidades de malas hierbas.

En el siguiente extracto de pseudocódigo se presenta el algoritmo diseñado para la generación de las coordenadas de cada una de las malas hierbas, donde es posible definir la cantidad de parches que se desean dentro del campo, y el rango de la cantidad de malas hierbas presentes en cada cúmulo.

*Algoritmo para la generación de un patrón aleatorio de distribución espacial de malas hierbas*  
*inicio*

*Constante N: número promedio de parches de malas hierbas*

*Constante a: número mínimo de malas hierbas por parches*

*Constante b: número máximo de malas hierbas por parches*

*Constante L: largo del campo de cultivo*

*Constante W: ancho del campo de cultivo*

*Constante  $\sigma$ : varianza de la posición de cada mala hierba*

*repetir*

*Se genera un número aleatorio entre  $-L/2$  y  $L/2$  para cada parche*

*Se genera un número aleatorio entre  $-W/2$  y  $W/2$  para cada parche*

*Se asigna la posición base del parche en el campo de cultivo*

*Se genera un número aleatorio entre a y b para cada parche*

*repetir*

*Se genera un número aleatorio siguiendo una función de distribución normal usando como media la posición X del parche base y como varianza el término  $\sigma$*

*Se genera un número aleatorio siguiendo una función de distribución normal usando como media la posición Z del parche base y como varianza el término  $\sigma$*

*Se asignan las coordenadas de la posición de la mala hierba*

*hasta – todas las malas hierbas pertenecientes al parche en cuestión tienen asignadas coordenadas.*

*hasta – todos los parches han sido generados*

*fin*

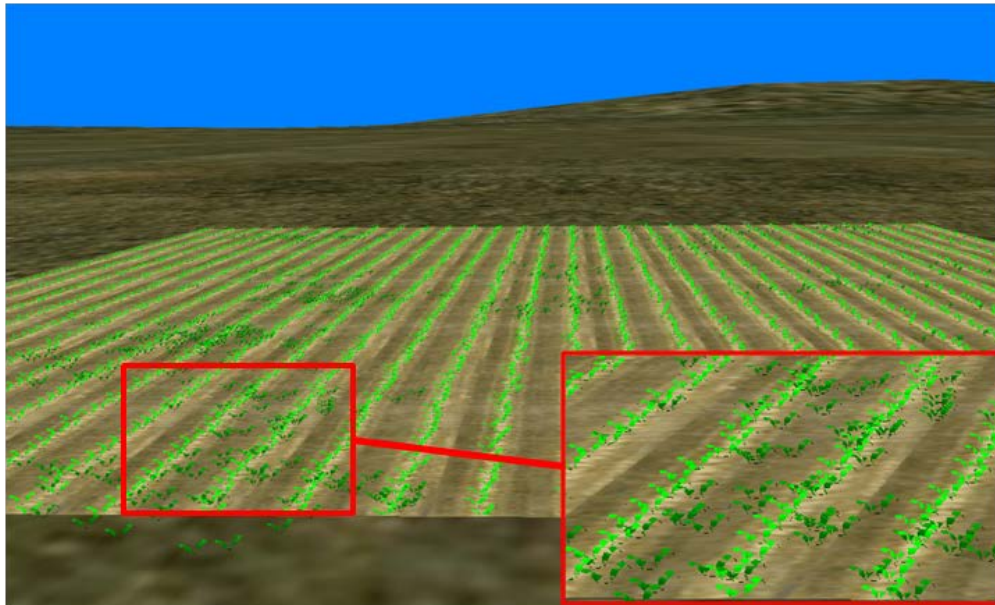
En el siguiente extracto de código se presenta la programación del algoritmo diseñado en la Interfaz de Configuración. Se define un punto aleatorio ( $P_x, P_y$ ) en el campo de cultivo donde se presenta un cúmulo de malas hierbas. En base a este punto, se genera una cantidad de malas hierbas, las cuales se disponen de forma aleatoria pero siguiendo una distribución de probabilidad normal.

```

%% Generación de las coordenadas de las malas hierbas
n_nucleos = 30;           % Cantidad de cúmulos de malas hierbas
min = 20; max = 30;       % Cantidad de malas hierbas en cada cúmulo
for i=1:n_nucleos
    % Se define la coordenada base del cúmulo i
    coord_org_MH(i,X) = random('unif',-(Largo_Campo/2),Largo_Campo/2);
    coord_org_MH(i,Y) = 0;
    coord_org_MH(i,Z) = random('unif',-(Ancho_Campo/2),Ancho_Campo/2);
end
for i=0:(n_nucleos-1)
    % Por cada cúmulo creado, se generan las coordenadas de cada mala
    % hierba presente en ese cúmulo.
    n_MH = ceil(random('unif',min,max));
    for j=1:n_MH
        coord_MH(j+n_MH2,X) = normrnd(coord_org_MH(i+1,X),1);
        coord_MH(j+i,Y) = 0;
        coord_MH(j+n_MH2,Z) = normrnd(coord_org_MH(i+1,Z),1);
        n_MH2 = n_MH2 + n_MH;
    end
end

```

El usuario define la cantidad de cúmulos de malas hierbas que se presentarán en el campo de cultivo ( $n\_nucleos$ ), y alrededor de cuántas malas hierbas desea por cada cúmulo. La función utilizada para determinar el punto ( $P_x, P_y$ ) de cada núcleo es la función de nombre `random('unif',a,b)` de Matlab, la cual genera un número aleatorio de distribución uniforme entre los valores  $a$  y  $b$ .



**Fig. 3-7. Ejemplo de un de un campo con cultivo (verde claro) virtual afectado por malas hierbas (verde oscuro)**

Una vez conocidas las coordenadas de las malas hierbas se utiliza la misma metodología para su representación en la Interfaz Gráfica que la utilizada para las plantas que conforman el campo de cultivo. En tal sentido, se genera un archivo llamado “Malla\_MH.proto” el cual tiene la misma estructura que el archivo “Malla.proto”, donde el usuario define otro estilo de planta diferente a la del cultivo para representar la mala hierba, como por ejemplo, la misma planta pero de diferente color. En la Fig. 3-7 se presenta un ejemplo de un campo de cultivo afectado por malas hierbas.

### 3.3 Flota de Robots

El entorno de simulación desarrollado contiene predefinido un conjunto de robots, los cuales pueden ser seleccionados para que formen parte de la flota que ejecutará las tareas definidas. Los robots presentes han sido diseñados siguiendo los parámetros presentados en la propuesta del proyecto RHEA (2011), los cuales se dividen en dos tipos:

**Unidades móviles aéreas:** basados en pequeños *quadrotors* (helicóptero de cuatro rotores), equipados con un sistema de visión que será capaz de proveer imágenes aéreas para la detección de los cúmulos de malas hierbas.

**Unidades móviles terrestres:** son pequeños vehículos autónomos de 4 ruedas que se encargarán de efectuar la gestión de malas hierbas. Existen dos tipos de unidades terrestres: robots con barra de herbicida abatible y robots con manipulador.

La flota de robots se encuentra situada en la base de operaciones del campo de cultivo, y parten de este punto para realizar la tarea asignada por el usuario según la misión deseada. El entorno de simulación permite que el usuario sitúe en el universo virtual la cantidad de robots que desee, y que en la misión especifique qué robots realizarán la tarea asignada.

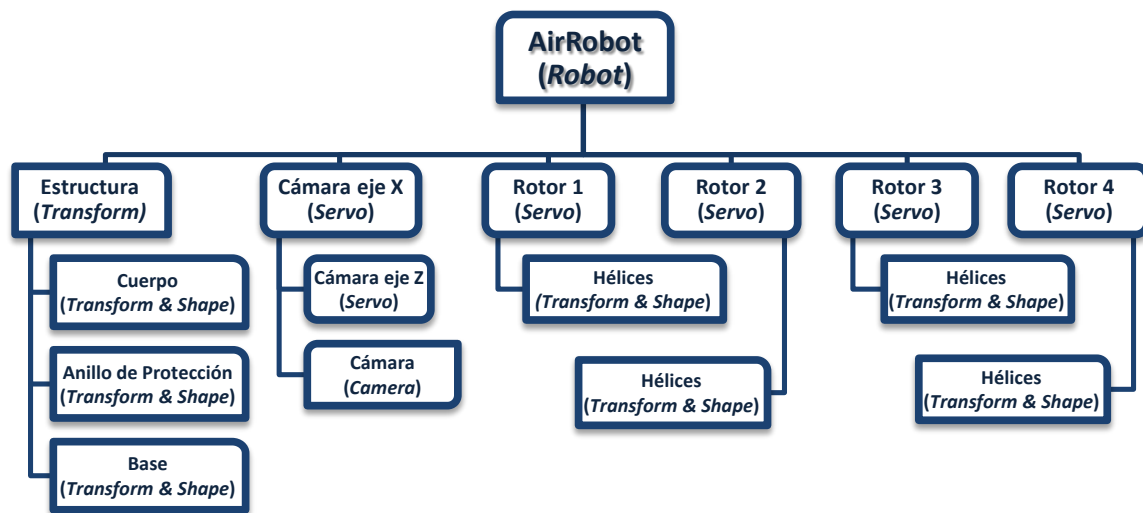
El entorno de simulación incorpora dos unidades aéreas y cuatro unidades terrestres, los que componen seis posibles robots para la flota inicial. Las dimensiones de las unidades móviles, tanto aéreas como terrestres, los sistemas sensoriales que tienen incorporados y los sistemas de gestión de malas hierbas han sido extraídos de la propuesta del proyecto RHEA para entregarle al usuario los elementos mínimos para el desarrollo de simulaciones. Además de los robots predefinidos, el usuario es capaz de modificar las dimensiones de los robots, añadir más sensores y actuadores, ampliar la flota de robots duplicando los ya existentes o incorporando nuevos diseños, además de implementar nuevos sistemas para la gestión de las malas hierbas.

### 3.3.1 Unidad Aérea

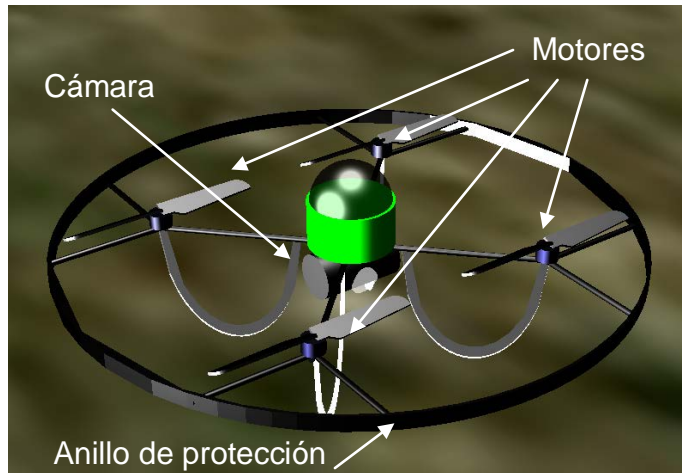
Las unidades aéreas previstas en el proyecto RHEA cuatri-rotor del tipo AR100-B, de 1 m de diámetro y 1 Kg. de peso, proporcionadas por la compañía (AirRobot GmbH & Co. KG 2010). Las características de esta unidad móvil son las siguientes:

1. Cuatro motores sin escobilla y sin reducción de 2000 rpm.
2. Un control barométrico de altitud
3. Un anillo de protección y un mecanismo para el aterrizaje
4. Sensores de aceleración y giroscopios.
5. Batería de Litio-Polímetro.
6. Aterrizaje autónomo si se pierde la comunicación por radio.

Para el proyecto RHEA se espera que esta unidad se encuentre dotada de una cámara, que se encargará de detectar los cúmulos de malas hierbas presentes en el campo de cultivo. Para el entorno de simulación desarrollado en este trabajo se ha diseñado un robot cumpliendo con las características enumeradas anteriormente. En la Fig. 3-8 se puede observar el desglose jerárquico de la estructura del robot diseñado, denominado “AirRobot” (como la compañía que lo manufactura), estructurado según los nodos de la herramienta Webots. El cuatri-rotor diseñado es un nodo del tipo *Robot* el cual contiene cuatro *servos* (servomotores) que representan los cuatro rotores de la unidad. Estos servomotores generan el movimiento rotatorio de las cuatro hélices.



**Fig. 3-8. Estructura jerárquica principal de los nodos que conforman a la unidad aérea diseñada**



**Fig. 3-9. Unidad Aérea diseñada para el entorno de simulación, observada mediante la Interfaz Gráfica de Usuario**

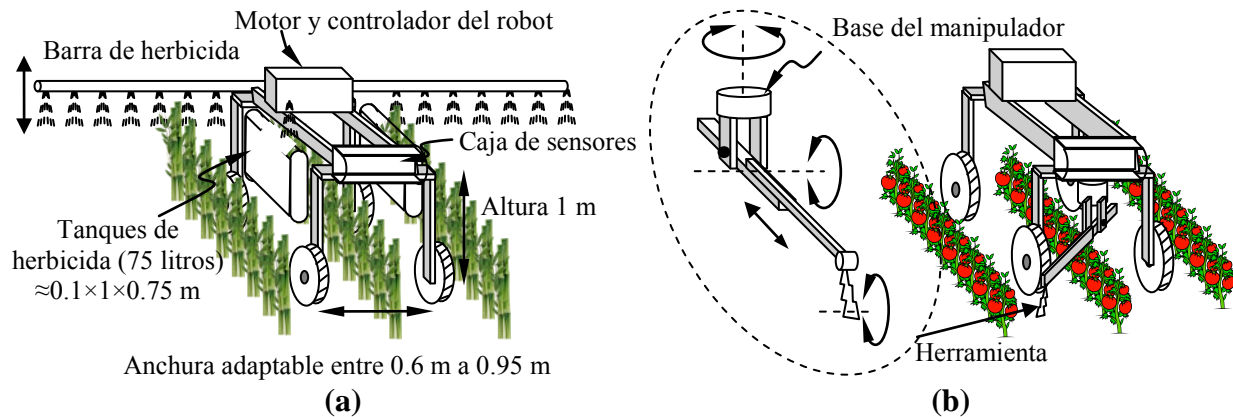
En conjunto con los rotores se ha diseñado la estructura que compone a esta unidad aérea, dígase el anillo de protección, la base que sirve de apoyo a la unidad cuando se encuentra en el suelo, y el cuerpo donde se encuentran los sistemas de control y sistemas sensoriales. Estas estructuras fueron diseñadas utilizando los nodos del tipo *transform* (transformación) y *shape* (forma). Se ha incorporado una cámara con dos posibles movimientos: uno que genera una rotación, la cual es perpendicular al suelo, y otro que genera una rotación paralela al suelo.

Este robot no ha sido diseñado para que pueda simular el modo de volar, es decir, que el movimiento de las hélices sea capaz de generar un empuje tal que eleve al robot en el mundo virtual. Esto se ha realizado así ya que esta unidad móvil será utilizada para ilustrar las funcionalidades de la cámara sobre un robot volador, pero no para evaluar su comportamiento físico ni su dinámica. Sin embargo, es posible simular su desplazamiento sobre el campo de cultivo con un controlador especializado, lo cual se explicará más adelante. En la Fig. 3-9 se puede observar el diseño final de la unidad aérea en la Interfaz Gráfica.

### **3.3.2 Unidades Terrestres**

Las unidades terrestres que conforman al entorno desarrollado se han diseñado siguiendo las especificaciones de la propuesta del proyecto RHEA. En esta propuesta se definen a las unidades móviles según la Fig. 3-10. Las dimensiones de estas unidades son las siguientes: una distancia entre los ejes de 1,5 m.; una distancia variable entre ruedas de 0,6 m. a 0,95 m.; y una altura de 1 m. Las unidades móviles contienen además dos sistemas sensoriales principales: un

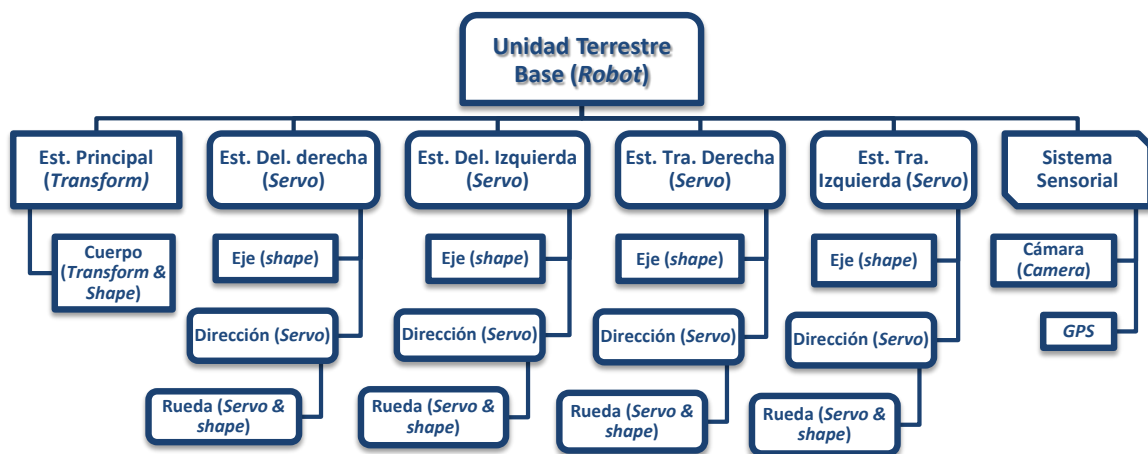




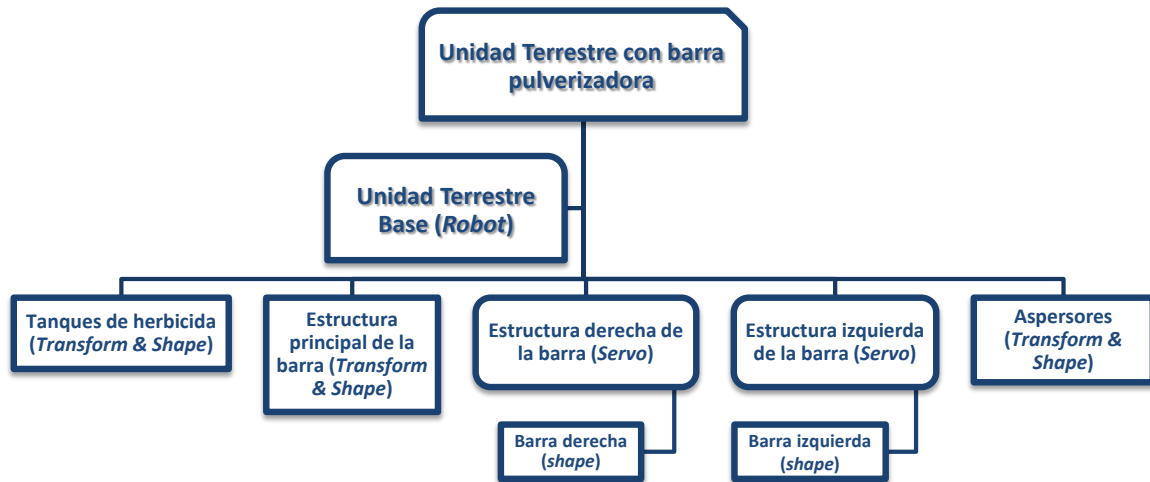
**Fig. 3-10. Configuración de la unidad terrestre del proyecto RHEA. a) Con barra pulverizadora. b) Con brazo manipulador. Figura extraída de la propuesta del proyecto RHEA (2011)**

GPS y una cámara. Estas unidades móviles pueden ser configuradas tanto para la gestión química de las malas hierbas, mediante el uso de una barra pulverizadora de herbicida (véase la Fig. 3-10 a), o la gestión mecánica, mediante el uso de un manipulador (véase la Fig. 3-10 b).

En tal sentido, se ha diseñado una unidad móvil terrestre base, siguiendo las dimensiones y geometrías definidas, la cual podrá ser equipada con los dos métodos diferentes de gestión de malas hierbas. En la Fig. 3-11 se puede observar el desglose jerárquico de la unidad móvil terrestre base, estructurado según los nodos de la herramienta Webots. Esta unidad se encuentra conformada por una estructura de cuatro ruedas capaz de modificar su anchura para poder ajustarse a diferentes tipos de cultivo, para así cumplir con una de las características definidas



**Fig. 3-11. Estructura jerárquica principal de los nodos que conforman a la base de la unidad móvil terrestre diseñada**

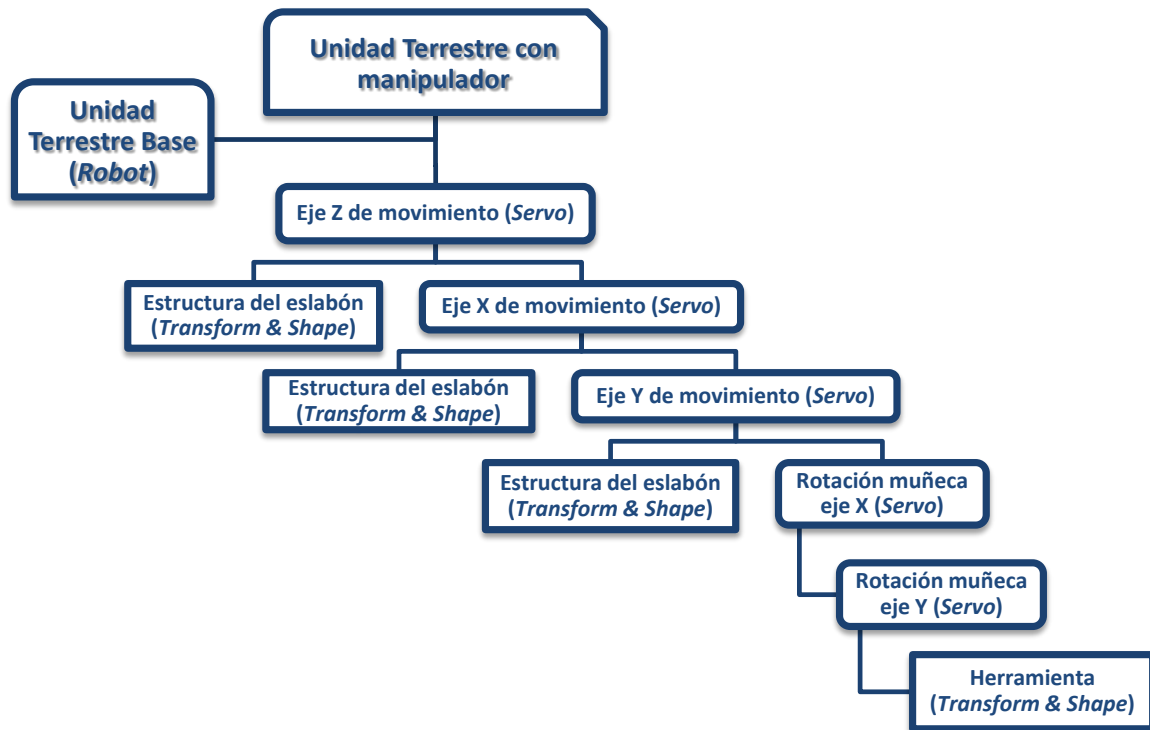


**Fig. 3-12. Estructura jerárquica principal de los nodos que conforman a la unidad móvil terrestre equipada con una barra pulverizadora de herbicida**

por la propuesta del proyecto RHEA. Para lograr esto se han colocado entre los soportes de las ruedas y la estructura principal del robot unos servomotores lineales, que aumentan o reducen el ancho del robot. La unidad móvil terrestre ha sido diseñada con tracción y dirección en las ruedas delanteras, además de ser equipada con una cámara y un GPS.

Utilizando la base de la unidad móvil terrestre es posible equiparla con dos sistemas de gestión de malas hierbas diferentes. El primer sistema consta de una barra pulverizadora de herbicida plegable, de 4,5 m. de largo dividida en tres secciones de 1,5 m. La sección central se encuentra fija en la estructura de la unidad móvil terrestre. En los extremos de esta sección central se acoplan las dos secciones restantes, las cuales se pliegan utilizando servomotores. Esta barra fue diseñada para contener 26 válvulas pulverizadoras, las cuales pueden ser simuladas para ser activadas o desactivada individualmente. Además de la barra pulverizadora, esta unidad móvil terrestre se encuentra equipada por un par de tanques los cuales albergan el herbicida. En la Fig. 3-12 se presenta el desglose jerárquico de la unidad móvil terrestre equipada con la barra de herbicida.

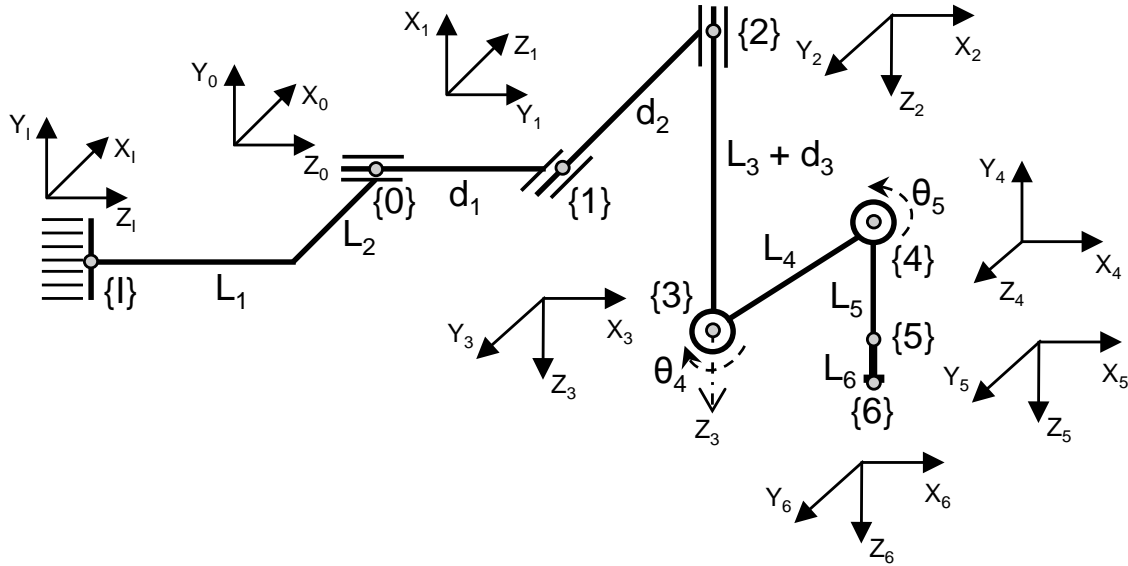
El segundo sistema diseñado para la gestión de las malas hierbas es un manipulador de 5 grados de libertad donde las primeras tres articulaciones son del tipo prismáticas (posicionamiento de la herramienta), y las últimas dos son rotacionales (orientación de la herramienta). Este manipulador contiene 4 módulos estructurales: Módulo Z, Módulo X, Módulo Y, y el brazo, el cual contiene en su extremo la muñeca y la herramienta de actuación. En la Fig. 3-13 se presenta el desglose jerárquico de la unidad móvil terrestre equipada con el manipulador.



**Fig. 3-13. Estructura jerárquica principal de los nodos que conforman a la unidad móvil terrestre equipada con manipulador de 5 grados de libertad**

Se ha obtenido el modelo cinemático directo (MCD) del manipulador para poder programar el controlador del mismo (Guilherme et al. 2010). Este modelo relaciona las coordenadas articulares del manipulador con las coordenadas (posición y orientación) de la herramienta en el espacio de la tarea. Para realizarlo se ha utilizado el método de parametrización de Denavit-Hartenberg (D-H) (Sciavicco y Siciliano 2000). En la Fig. 3-14 se presenta el modelo esquemático del manipulador, donde se especifican los sistemas de coordenadas de cada articulación siguiendo el método de D-H.

El volumen apto para el movimiento del manipulador viene dado según el espacio disponible dentro de la unidad terrestre de la flota RHEA (2011). Por tanto, el volumen efectivo de trabajo es de 1 m de ancho por 0.26 m de largo por 0,12 m de alto, por lo que en la Tabla 1 se presentan los parámetros de D-H calculados siguiendo el modelo esquemático de la Fig. 3-14 y las dimensiones definidas por la propuesta del proyecto RHEA. Se ha definido que la muñeca que se encarga de orientar la herramienta especializada es una articulación del tipo esférica, por lo tanto, el valor de las longitudes  $L_4$  y  $L_5$  es cero.



**Fig. 3-14. Modelo esquemático de la cinemática del manipulador**

Tabla 1. Parámetros de D-H para el manipulador de 5 grados de libertad

Articulación i	$\theta_i$ [rad]	$d_i$ [m]	$a_i$ [m]	$\alpha_i$ [rad]	Valores [m]
0	0	$-L_1$	$-L_2$	0	$L_1 = 0,41$
1	$\pi/2$	$d_1$	0	$\pi/2$	$L_2 = 0,13$
2	$\pi/2$	$d_2$	0	$-\pi/2$	$L_3 = 0,8$
3	0	$L_3 + d_3$	0	0	$L_4 = 0$
4	$\theta_4$	0	$L_4$	$-\pi/2$	$L_5 = 0$
5	$\theta_5$	$L_5$	0	$\pi/2$	$L_6 = 0,15$
6	0	$L_6$	0	0	

El sistema de referencia inercial {I} (véase la Fig. 3-14) ha sido seleccionado de tal manera que corresponda con las coordenadas X, Z del centro de masa de la unidad terrestre, a una altura de 1 m sobre el suelo (véase la Fig. 3-17).

Con los parámetros D-H es posible calcular las matrices de transformación homogénea que relacionan los sistemas de coordenadas de cada articulación entre sí. En tal sentido, podemos obtener la matriz de rotación  ${}^I R_6$  que relaciona el sistema de referencia del elemento final {6} con respecto al sistema de referencia inercial {I} del manipulador, que resulta ser:

$${}^I R_6 = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_5) \operatorname{sen}(\theta_4) & -\cos(\theta_4) & -\operatorname{sen}(\theta_4) \operatorname{sen}(\theta_5) \\ \operatorname{sen}(\theta_5) & 0 & -\cos(\theta_5) \\ \cos(\theta_4) \cos(\theta_5) & -\operatorname{sen}(\theta_4) & \cos(\theta_4) \operatorname{sen}(\theta_5) \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

Además, podemos obtener el vector  ${}^I p_6$  de coordenadas X, Y, Z del elemento final {6} con relación a las coordenadas del sistema de referencia inercial {I}, resultando:

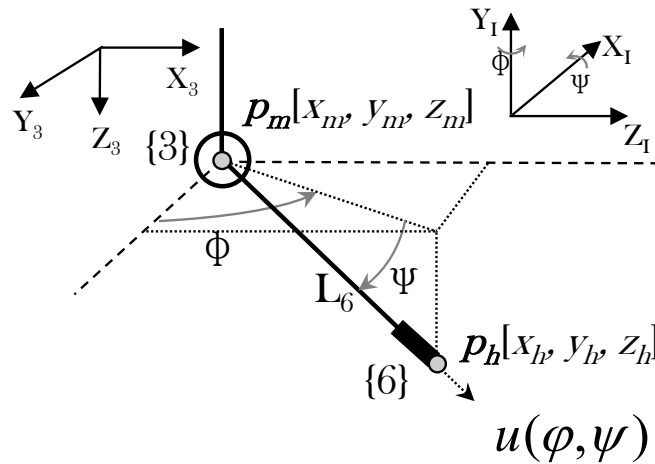
$${}^I p_6 = \begin{bmatrix} d_2 - L_2 - L_6 (\text{sen}(\theta_4) \text{sen}(\theta_5)) \\ -L_3 - d_3 - L_6 \cos(\theta_5) \\ d_1 - L_1 + L_6 (\cos(\theta_4) \text{sen}(\theta_5)) \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

En resumen, la matriz de transformación homogénea  ${}^I T_6$  que relaciona la posición y orientación de la herramienta con respecto al sistema de referencia inercial del manipulador viene dada por:

$${}^I T_6 = \begin{bmatrix} {}^I R_6 & {}^I p_6 \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

Una vez obtenido el MCD, es necesario obtener el modelo cinemático inverso (MCI) del manipulador. La tarea a realizar define la posición y orientación de la herramienta en el espacio de la tarea, que es una descripción de alto nivel. El MCI proporciona las coordenadas articulares del manipulador ( $d_1, d_2, d_3, \theta_4, \theta_5$ ), a partir de las coordenadas de la herramienta en el espacio de la tarea ( $x_h, y_h, z_h, \varphi, \psi$ ) (véase la Fig. 3-15). Este modelo se ha desarrollado mediante la técnica del desacoplo cinemático (Barrientos et al. 1997). En tal sentido, dado el vector de posición,  $p_h$ , y la orientación  $\vec{u}(\varphi, \psi)$  de la herramienta definidos por la tarea, podemos obtener la posición necesaria  $p_m[x_m, y_m, z_m]$  de la muñeca, que viene dada por:

$$p_m = p_h - L_6 \vec{u}(\varphi, \psi) \quad (3-4)$$



**Fig. 3-15. Aplicación de desacoplo cinemático. El origen de coordenadas del sistema {3} coincide con la posición de la muñeca**

Para obtener las coordenadas articulares ( $d_1, d_2, d_3$ ) necesarias para situar a la muñeca en la posición deseada  $p_m$ , se utiliza la matriz de transformación homogénea  ${}^I A_3$ , que viene dada por:

$${}^I A_3 = \begin{bmatrix} {}^I R_3 & {}^I p_3 \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & d_2 + L_2 \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 - L_3 \\ 1 & 0 & 0 & d_1 + L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

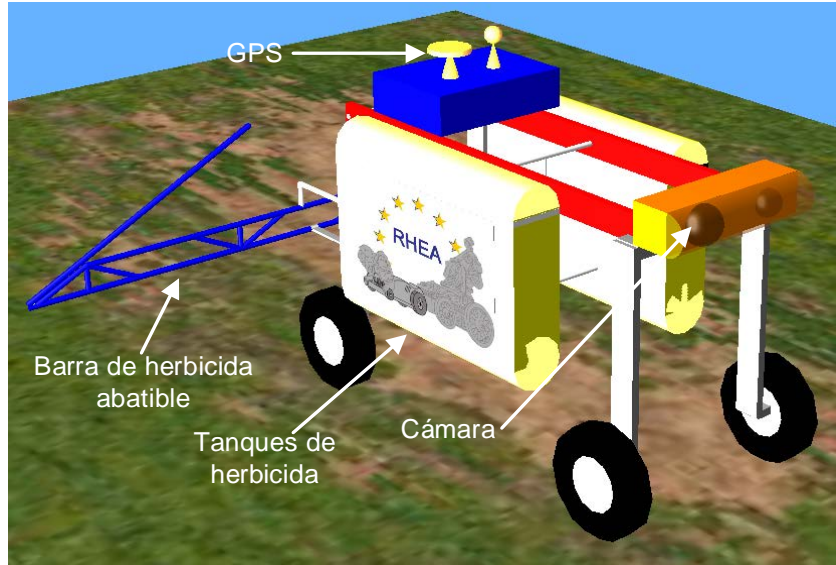
Las coordenadas articulares ( $d_1, d_2, d_3$ ) en función de  $p_m$  vienen dadas por:

$${}^I p_3 = \begin{bmatrix} d_2 + L_2 \\ -d_3 - L_3 \\ d_1 + L_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = p_m \Rightarrow \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_m + L_1 \\ x_m - L_2 \\ -y_m - L_3 \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

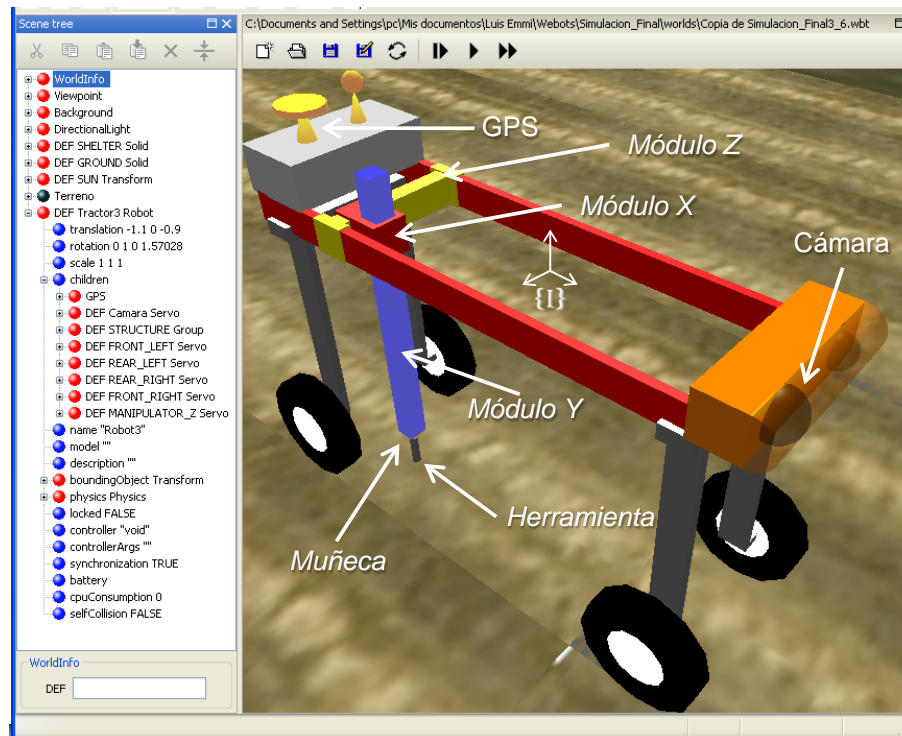
Para finalizar, las coordenadas articulares de los últimos dos actuadores vienen dadas por:

$$\theta_4 = -\varphi; \theta_5 = \pi/2 - \psi \quad (3-7)$$

En conclusión, en la Fig. 3-16 se puede observar el diseño final de la unidad terrestre equipada con la barra abatible pulverizadora de herbicida, visualizada mediante la Interfaz Gráfica de Usuario, y en la Fig. 3-17 se presenta el diseño final de la unidad terrestre equipada con un manipulador de 5 grados de libertad vista en la Interfaz Gráfica de usuario.



**Fig. 3-16. Unidad Terrestre diseñada para el entorno de simulación, equipada con barra pulverizadora de herbicida, observada mediante la Interfaz Gráfica de Usuario**



**Fig. 3-17. Unidad terrestre diseñada para el entorno de simulación, equipada con manipulador observada mediante la Interfaz Gráfica de Usuario**

### 3.4 Evaluación del entorno de simulación

Para evaluar el entorno de simulación se ha desarrollado un ejemplo que representa diferentes tareas realizadas por la flota de robots RHEA. Para lograr esto, se ha diseñado un algoritmo de control para la gestión química de malas hierbas, el cual controla el movimiento de las unidades móviles de la flota de robots y la acción de la barra de herbicida.

La “Misión” definida para esta simulación consta de las siguientes tareas:

1. Sobrevuelo del campo de cultivo por parte de la unidad aérea, la cual simula la detección de malas hierbas.
2. Barrido del campo de cultivo por parte de dos unidades terrestres, las cuales simulan la detección de las líneas de cultivo y la localización exacta de las malas hierbas.
3. Acción de la barra pulverizadora de herbicida, la cual activa las válvulas justamente donde se encuentran las malas hierbas.

En las aplicaciones reales, las unidades autónomas que ejecutan una gestión de malas hierbas utilizan diferentes algoritmos de procesamiento de imágenes para, utilizando las imágenes que proveen las cámaras incorporadas en las unidades autónomas, detectar las malas hierbas y las líneas de cultivo en el campo. Para evaluar el entorno desarrollado se ha dado por hecho el procesamiento de las imágenes proporcionadas por las cámaras presentes en los robots, por lo que son conocidas las coordenadas de las malas hierbas y de las líneas de cultivo incluso antes de ejecutar la simulación. Estas coordenadas se generan en la **Etap 1** de programación, almacenadas en un archivo de datos, las cuales pueden ser accedidas por los controladores de los robots.

Conocidas las coordenadas de las malas hierbas y de las líneas de cultivo, la evaluación de este entorno se concentra en el diseño de trayectorias para las unidades móviles y del controlador de la barra pulverizadora. En tal sentido, para esta simulación se han desarrollado tres controladores diferentes, dos de ellos controlan las unidades móviles y el tercero controla la acción de la barra pulverizadora de herbicida y la simulación del procesamiento de imágenes.

#### ***3.4.1 Controlador de la unidad Aérea***

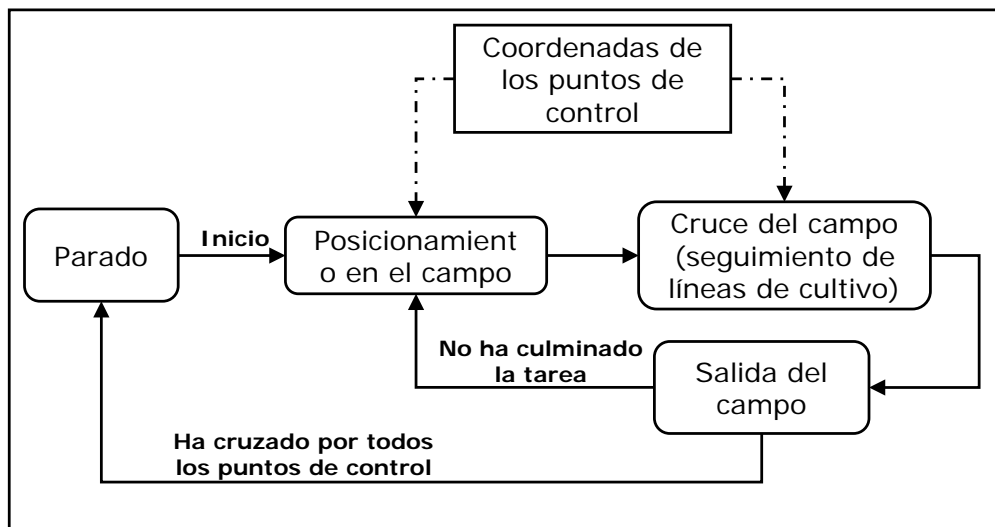
Como se ha indicado anteriormente, la unidad aérea se encuentra compuesta por 4 rotores y una cámara. El controlador de esta unidad genera movimiento en las 4 hélices del robot, a una velocidad definida por el usuario, y habilita o deshabilita la cámara, cuyas imágenes se presentan en una ventana dentro de la Interfaz Gráfica. Esta unidad aérea fue construida sin tomar en cuenta las propiedades físicas de sus elementos, por lo que el movimiento de las hélices no genera ningún tipo de fuerza.

El desplazamiento de esta unidad aérea sobre el campo de cultivo se realiza utilizando un controlador especial llamado “Supervisor”, el cual es capaz de modificar la posición en el mundo virtual de cualquier objeto perteneciente a éste mientras se ejecuta la simulación. Este controlador se detalla posteriormente en el apartado 3.4.3.1.

#### ***3.4.2 Controlador de la unidad Terrestre***

Las unidades terrestres tienen incorporados un GPS, una cámara, y un conjunto de actuadores que controlan el movimiento de las ruedas, la dirección del robot y el ancho del mismo (véase la Fig. 3-16). El GPS de la unidad terrestre se utiliza para posicionar al robot en el campo de cultivo, calcular su dirección sobre el campo, y determinar su posición con respecto a





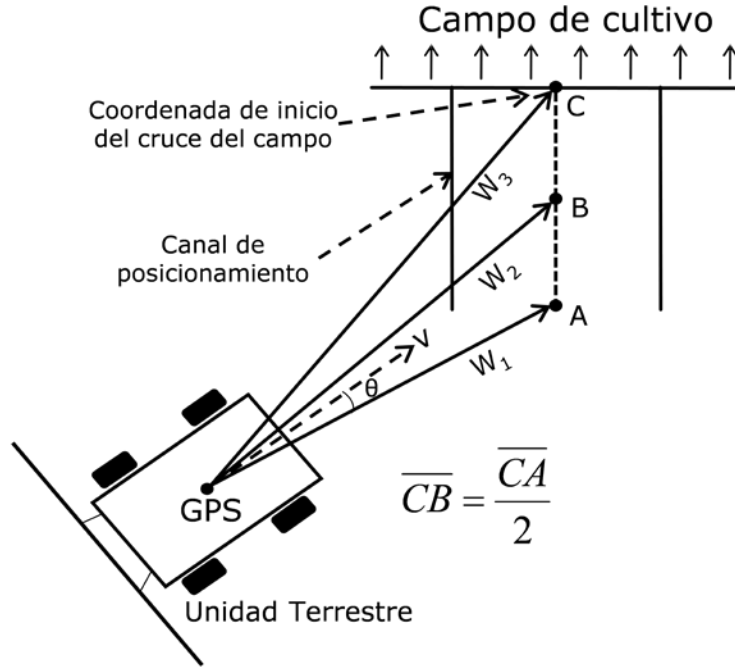
**Fig. 3-18. Algoritmo de control del movimiento de las unidades terrestres**

los puntos de control que debe seguir. La cámara incorporada en esta unidad móvil simula la detección de las malas hierbas y la línea de cultivo, la cual puede ser activada o desactivada por el usuario.

El algoritmo de control del movimiento de las unidades terrestres consta de 4 estados diferentes (véase la Fig. 3-18): parado, posicionamiento en el campo, desplazamiento sobre el campo y salida del campo. Este algoritmo de control, o diagrama de estados, se ejecutará hasta que cada unidad terrestre cumpla con la tarea asignada por la misión, que consiste en completar el seguimiento de todos los puntos de control fijados.

Para esta simulación se ha generado una trayectoria sencilla que el robot debe seguir para realizar un barrido completo del campo de cultivo. Cuando se crea la misión, el usuario indica la cantidad de unidades terrestres que actuarán sobre las malas hierbas y la longitud de la barra de herbicida instalada en éstas. Con estos valores se genera un conjunto de coordenadas  $X_i-Z_i$  que indican el inicio y fin de cada uno de los desplazamientos que deben realizar las unidades terrestres sobre el campo de cultivo. Estas coordenadas se almacenan en un archivo de datos que utilizan los controladores de los robots terrestres para generar trayectorias.

Para que las unidades terrestres se incorporen con un ángulo de ataque correcto sobre el campo de cultivo, lo cual corresponde al estado “posicionamiento en el campo” (véase la Fig. 3-18), se ha creado un canal virtual al inicio de cada desplazamiento (véase la Fig. 3-19). Este canal fue diseñado para asegurar que, independientemente de la procedencia de la unidad terrestre, ésta va a incorporarse al campo de cultivo correctamente y no va a poner en riesgo los



**Fig. 3-19. Posicionamiento en el campo de cultivo. Canal Virtual**

cultivos presentes allí. Este canal virtual se compone de tres puntos importantes (A, B y C), donde:

- El punto C representa la coordenada  $X_i$ - $Z_i$  de inicio del desplazamiento sobre el campo de cultivo.
- La distancia  $\overline{CA}$  representa la longitud del canal, la cual puede ser configurada por el usuario.
- El punto B representa la mitad de la longitud del canal virtual.

Las unidades terrestres se controlan modificando el ángulo de giro ( $\theta$ ) de sus ruedas delanteras, mediante la siguiente expresión:

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{\overline{\vec{W}_i} \cdot \vec{V}}{|\vec{V}| \cdot |\overline{\vec{W}_i}|} \right) \text{signo}(\overline{\vec{W}_i} \times \vec{V}) \quad (3-8)$$

Donde el vector  $\vec{V}$  representa la dirección y sentido de la unidad terrestre y el vector  $\overline{\vec{W}_i}$  representa la posición de la unidad terrestre con respecto al punto de control actual. El vector  $\vec{V}$  es la velocidad de la unidad terrestre, que se calcula con la información obtenida del GPS

derivando la posición de la unidad terrestre en el intervalo de tiempo del controlador. Al realizar el ajuste en el ángulo ( $\theta$ ) de las ruedas de la unidad terrestre, representado por la ecuación (3-8), se busca que el vector velocidad  $\vec{V}$  se superponga con el vector  $\vec{W}_i$ , para así dirigir a la unidad terrestre a la coordenada deseada.

El estado “posicionamiento del campo” (véase la Fig. 3-18) que se realiza utilizando el canal virtual, se encuentra dividido en tres etapas, las cuales corresponden a los tres vectores  $\vec{W}_i$  presentes en la Fig. 3-19. Tanto en la primera etapa (vector  $\vec{W}_1$ ) como en la tercera (vector  $\vec{W}_3$ ), la unidad terrestre se desplaza a velocidad máxima, mientras que en la segunda etapa disminuye su velocidad a la mitad para un mejor control en el giro.

Al completar el estado “posicionamiento en el campo”, la unidad terrestre se encarga de atravesarlo, por lo que se actualiza el punto de control que debe seguir (véase la Fig. 3-18), y se simula el seguimiento de las líneas de cultivo. Mientras la unidad terrestre atraviesa el campo de cultivo, el controlador “Supervisor” se encarga de activar y desactivar las válvulas de herbicida en las coordenadas exactas de las malas hierbas.

Una vez que la unidad terrestre atraviesa el campo de cultivo se aleja una distancia segura del mismo, la cual puede ser configurada por el usuario, para permitirle girar y posicionarse correctamente sobre el campo de cultivo. Este algoritmo se repite hasta que el robot haya cruzado por todos los puntos de control y cumpla con la tarea asignada.

### **3.4.3 Controlador Supervisor**

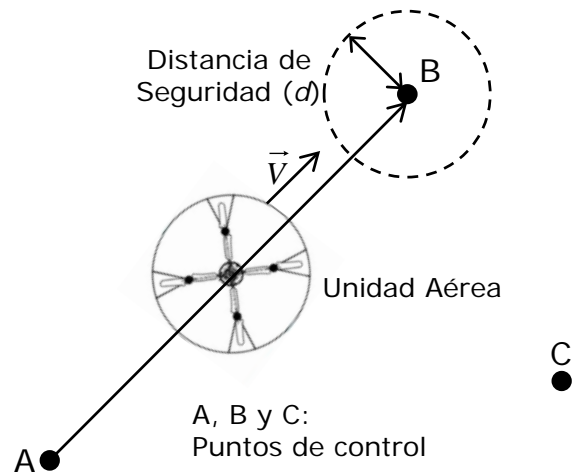
El controlador supervisor se encarga de simular tres acciones diferentes:

1. El desplazamiento de la unidad aérea sobre el campo de cultivo a una velocidad constante.
2. La activación de cada una de las válvulas de la barra de herbicida.
3. El procesamiento de imágenes para la detección de las líneas de cultivo.

Estas acciones se detallan en las tres siguientes secciones.

#### **3.4.3.1 Control de movimiento de la unidad aérea**

Para el caso de la evaluación del entorno de simulación, el control de movimiento de la unidad aérea se ha realizado utilizando el controlador “Supervisor”. Dada la trayectoria que el usuario desea que la unidad aérea realice, este controlador ejecuta el cálculo de las coordenadas



**Fig. 3-20. Algoritmo de control del movimiento de la unidad aérea**

del robot en cada instante de muestreo, las cuales dependen del periodo de muestreo, de la distancia entre la posición del robot y el siguiente punto de control, y de la velocidad del robot definida por el usuario.

Para esta simulación se ha definido una trayectoria sencilla para la unidad aérea, la cual puede modificarse en la **Etapá 1** de la programación del entorno de simulación. Esta trayectoria se encuentra conformada por una serie de puntos de control, que deben ser seguidos por el robot a una velocidad constante. Cuando la unidad móvil haya recorrido todos los puntos de control en el orden especificado, el robot habrá realizado un barrido completo sobre el campo de cultivo.

Para calcular la siguiente posición de la unidad aérea, el controlador “Supervisor” divide la trayectoria que debe recorrer el robot en líneas rectas que unen dos puntos de control adyacentes (véase la Fig. 3-20). Se calcula la distancia entre ambos puntos de control ( $\overline{AB}$ ), y dependiendo de la velocidad deseada del AirRobot ( $\vec{V}$ ), el controlador incrementa en un pequeño paso ( $p$ ) la posición del robot en cada tiempo de muestreo ( $TIME\_STEP$ ), esto es:

$$p(x, y, z) = \frac{\overline{AB}}{|\overline{AB}|} (|\vec{V}| TIME\_STEP) \quad (3-9)$$

Cuando la unidad aérea se encuentra muy cerca del punto de control actual (“Distancia de Seguridad”  $d$ , Fig. 3-20) el controlador actualiza el seguimiento al siguiente punto de control (C), y vuelve a calcular el paso ( $p$ ) para la siguiente trayectoria recta.

Así, se logra generar un efecto de movimiento creado por el empuje de las hélices de la unidad aérea, las cuales rotan a una velocidad definida también por el usuario, pero que en realidad no generan empuje alguno.

#### ***3.4.3.2 Algoritmo de control de la barra pulverizadora***

Se desea simular una aplicación controlada del herbicida, que consiste en aplicar solamente en las coordenadas correctas de las malas hierbas. Para el control de la barra de herbicida también se ha utilizado el controlador “Supervisor”, el cual activa el herbicida que se representa mediante un cono verdoso. Para lograr esto cada válvula se controla de forma independiente y se activa cuando se presenta una mala hierba dentro de su área de acción.

#### ***3.4.3.3 Simulación de la detección de las líneas de cultivo***

En la **Etapas 1** de la programación del entorno de simulación se han generado las líneas de cultivo según las especificaciones del usuario. Para esta simulación se da por hecho el procesamiento de imágenes para la detección de las líneas de cultivo y se utiliza la información generada al configurar el universo virtual de simulación para guiar a las unidades terrestres sobre el campo de cultivo sin destruir las plantas presentes.

Para producir los efectos visuales, se han creado unas líneas imaginarias que se colocan encima de las líneas de cultivo para representar el procesamiento de imágenes. Estas líneas imaginarias pueden ser activadas o desactivadas por el usuario utilizando el controlador “Supervisor”, y en conjunto con las imágenes tomadas por la cámara presente en las unidades terrestres, se genera un efecto de procesamiento de imágenes para la detección de líneas de cultivo.

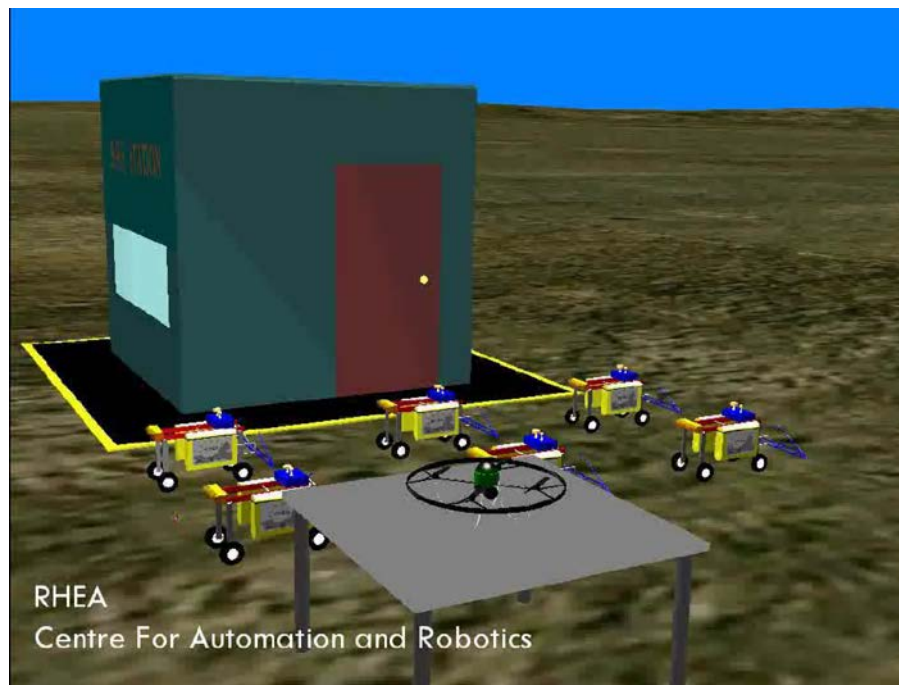


## Capítulo 4 - Resultados

Mediante la evaluación del entorno de simulación desarrollado se ha generado un video mediante el cual se representa de manera general lo que se desea obtener al finalizar el proyecto RHEA. En este video se presentan las diferentes tareas que deben realizar las unidades que conforman la flota de robots del proyecto RHEA cuando ejecutan una gestión de malas hierbas sobre un campo de cultivo mediante el uso de herbicida. A continuación se presentarán una serie de imágenes instantáneas del video desarrollado, el cual se podrá observar completo en la página web del proyecto RHEA, en la sección *Project summary*. (<http://www.rhea-project.eu/>).

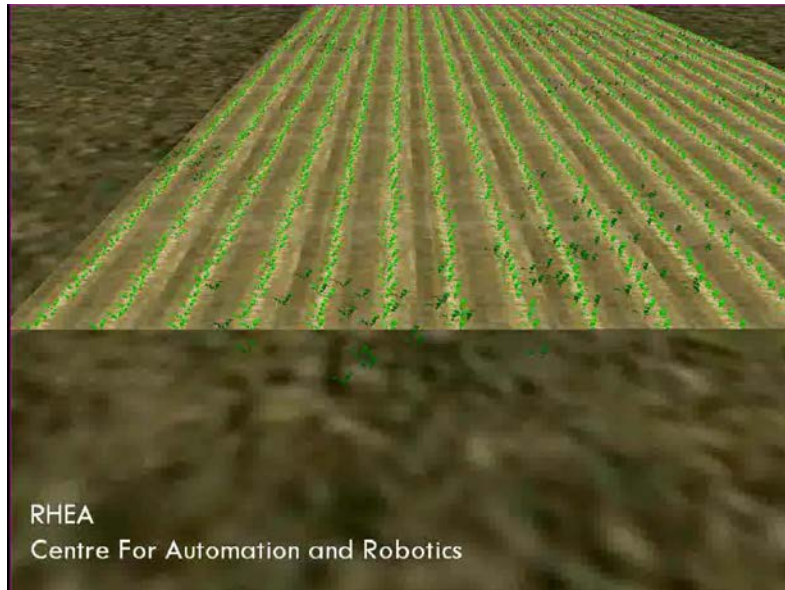
En la primera parte del video se presenta a toda la flota de robots, que para este caso se encuentra conformada por 6 unidades terrestres equipadas con la barra pulverizadora de herbicida, y una unidad aérea. Las unidades terrestres se encuentran próximas a la base de operaciones, esperando a que se les indique la tarea individual que deben realizar. La unidad aérea se encuentra en una plataforma a la espera también de comenzar las tareas de visualización del terreno para la detección de las malas hierbas.

Una vez que la unidad aérea parte en vuelo para observar el campo de cultivo, y mediante



**Fig. 4-1. Imagen instantánea de la organización de la flota de robots y la base de operaciones**

la cámara incorporada en ella, logra detectar las malas hierbas presentes en el terreno. En la Fig. 4-2 a) se puede observar la imagen obtenida por la unidad aérea del campo de cultivo mientras lo sobrevuela, y en la Fig. 4-2 b) se presenta la simulación del procesamiento de dicha imagen, donde en ella se detecta la presencia de malas hierbas (plantas de color rojo), en relación al



a)



b)

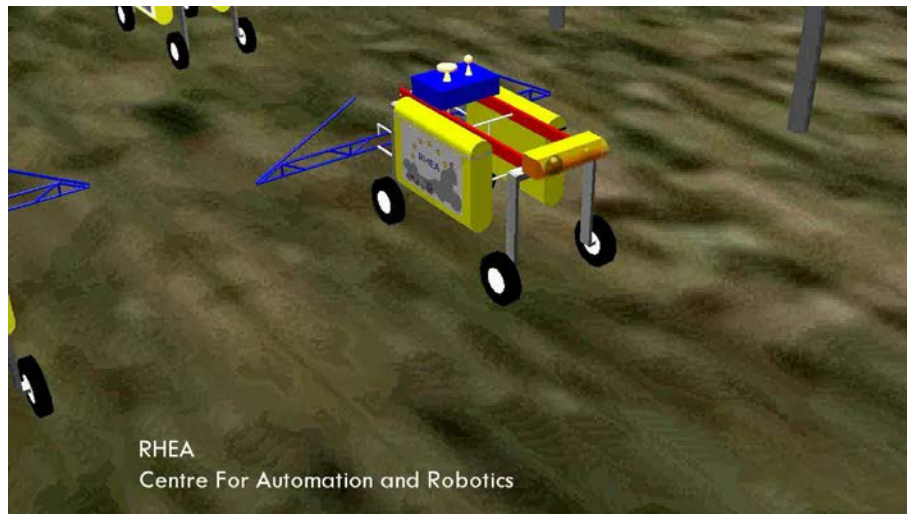
**Fig. 4-2. Imagen instantánea de las fotografías obtenidas por la cámara de la unidad terrestre, donde se detectan las malas hierbas (plantas rojo) en relación al cultivo (plantas azules)**



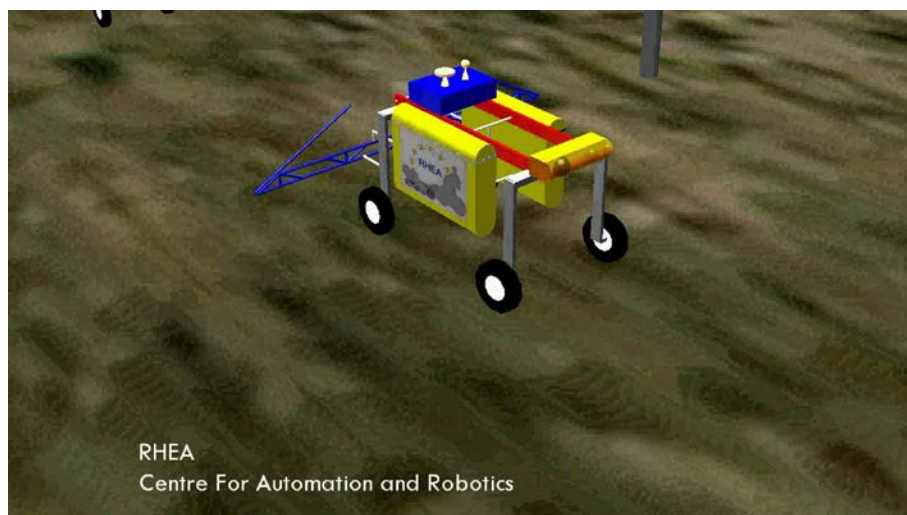
cultivo (plantas de color azul).

Una vez que la unidad aérea ha sobrevolado el campo de cultivo completamente y ha obtenido las imágenes necesarias, es momento de que las unidades terrestres entren al campo de cultivo para comenzar su trabajo. Estas unidades son capaces de ajustar su anchura para adaptarse al tipo de cultivo plantado. En la Fig. 4-3 se presenta el ajuste de la unidad terrestre antes de ingresar al campo de cultivo.

Una vez ajustado el tamaño de la unidad terrestre, ésta continua con su movimiento para

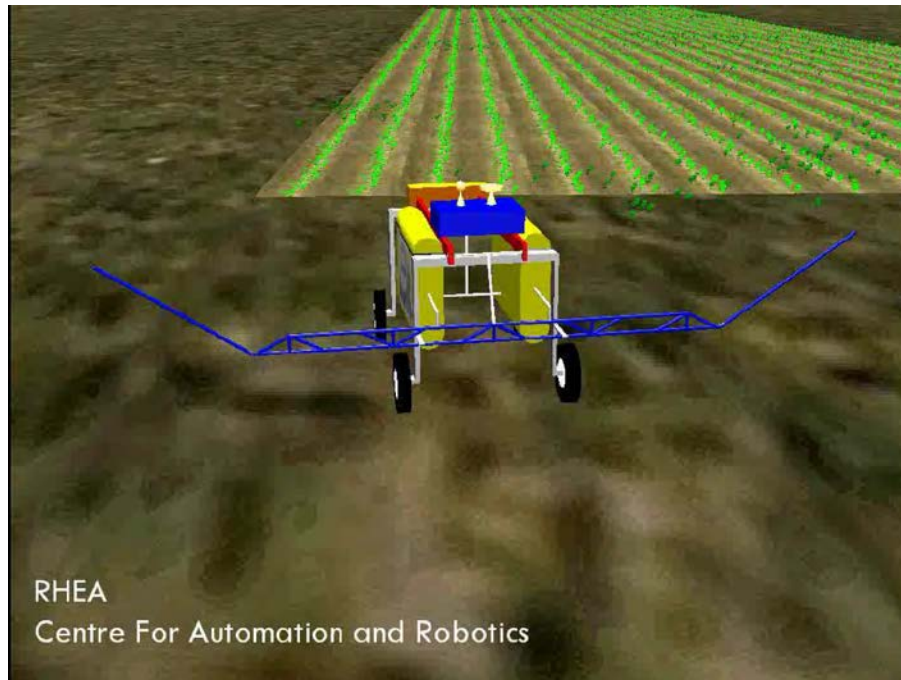


a)



b)

**Fig. 4-3. Imagen instantánea de la unidad terrestre mientras ajusta su anchura para adecuarse al terreno donde debe efectuar el tratamiento. a) antes, b) después del ajuste.**



**Fig. 4-4. Imagen instantánea de la organización de la flota de robots y la base de operaciones**

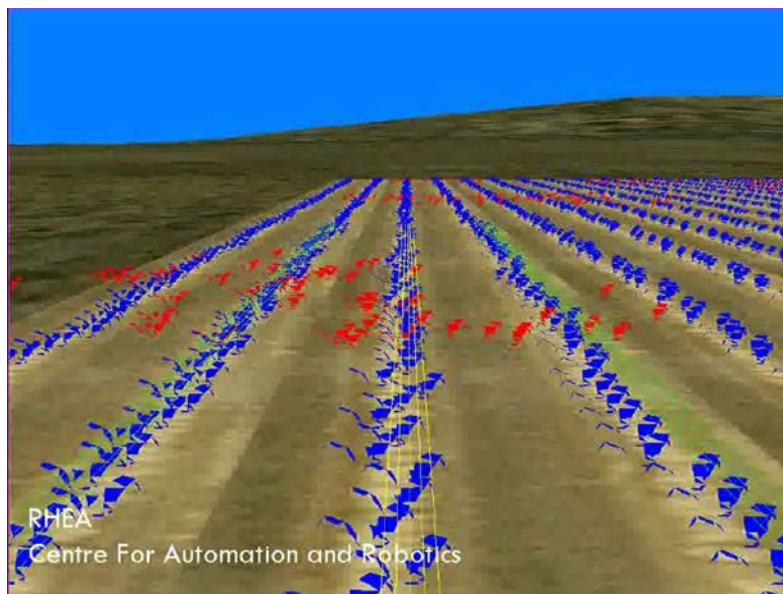
posicionarse en el campo de cultivo, y mientras se posiciona correctamente siguiendo el algoritmo descrito en el apartado 3.4.2, despliega la barra pulverizadora de herbicida, como se muestra en la Fig. 4-4.

Una vez que la unidad terrestre se ha posicionado en el campo, y ya con la barra pulverizadora desplegada, procede a realizar su trabajo sobre el campo, desplazándose sobre todo el campo la cantidad de veces que la planificación de la misión le ha indicado. Para poderse desplazar sin problemas sobre el campo de cultivo y sin poner en peligro al cultivo presente, en este video se ha simulado la detección de los surcos para poder guiar a la unidad terrestre de manera precisa sobre el terreno. Esta detección de surcos se simula generando líneas rectas sobre la imagen procesada proveniente de la cámara de la unidad terrestre (véase la Fig. 4-5 b).

Además de la detección de los surcos para el correcto guiado de la unidad terrestre, la cámara debe también realizar la detección precisa de las malas hierbas presentes a su paso y a lo largo de la distancia de actuación de la barra pulverizadora de herbicida. Esta cámara, al igual que la equipada en la unidad aérea, logra detectar las malas hierbas, y determina su posición con respecto a la posición de la unidad terrestre en ese instante de tiempo (véase la Fig. 4-5 b).



a)



b)

**Fig. 4-5. Imágenes instantáneas de la fotografía obtenida por la cámara de la unidad terrestre mientras se desplaza por el campo de cultivo. a) imagen sin procesar, b) imagen procesada donde se detecta la línea de cultivo central (líneas amarillas) y sus dos más adyacentes (líneas verdes), además de detectar las malas hierbas presentes (plantas rojas)**

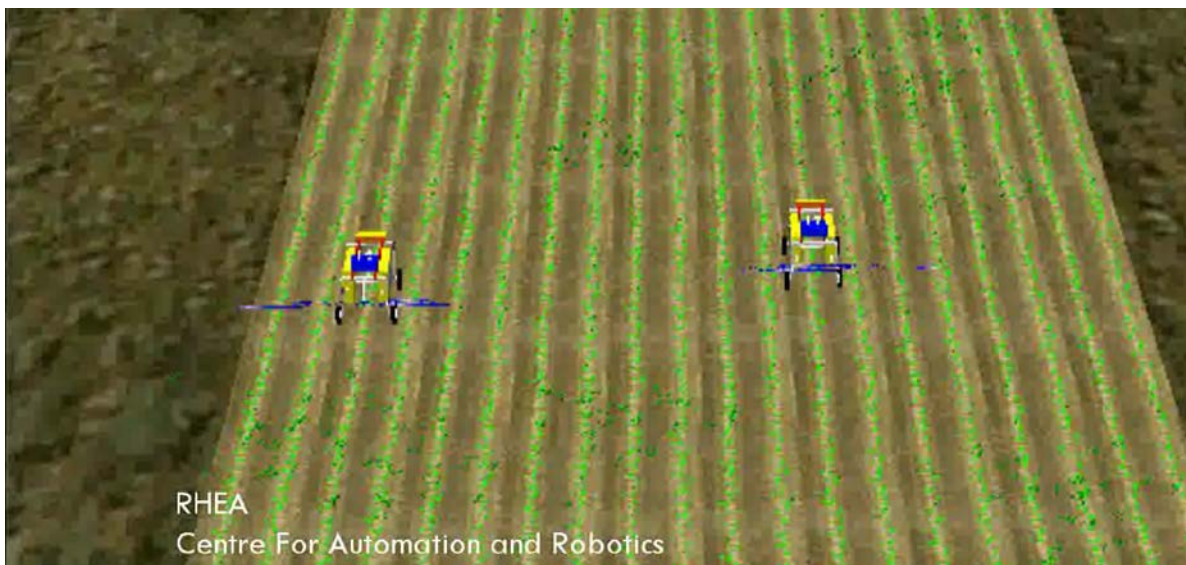




**Fig. 4-7. Imagen instantánea de la unidad terrestre en donde se observa la activación individual de los pulverizadores ante la presencia de malas hierbas**

Con estos datos, y conociendo las posiciones individuales de cada pulverizador de herbicida, el controlador de la unidad activa o desactiva a estos pulverizadores dependiendo de si bajo ellos se encuentran malas hierbas o no. En la Fig. 4-7 se puede observar la simulación de la actuación precisa de los pulverizadores ante la presencia de malas hierbas.

Para la simulación presentada en el video en cuestión, la misión se había definido de tal manera que fueran solamente dos unidades terrestres las que efectuaran el tratamiento en el campo de cultivo, tal como se muestra en la parte final del video (véase la Fig. 4-6).



**Fig. 4-6. Imagen instantánea de dos unidades terrestres efectuando tareas en conjunto**

Con este video fue presentado el proyecto RHEA en su primera reunión con todos los participantes del proyecto, realizada en el mes de Septiembre del año 2010.



## Capítulo 5 - Conclusiones

Este Trabajo de Fin de Máster concluye en 7 puntos que definen las contribuciones más interesantes que se han obtenido. El trabajo tiene una clara extensión que pretende dejar disponible el sistema de simulación a toda la comunidad científica a través de internet. Esto permitirá desarrollar la idea inicial de diseñar un sistema abierto que permita a otros investigadores su extensión y perfeccionamiento. La integración de diversos elementos junto con los nuevos modelos diseñados y adaptados al problema que se resuelve otorga al presente trabajo un carácter innovador, cuya idea puede aplicarse a otros entornos y aplicaciones diferentes.

Las contribuciones más importantes se resumen en:

### **1. Entorno de simulación: Concepto del sistema.**

Observando los nuevos desarrollos científicos realizados en los últimos años en agricultura, es posible prever una tendencia hacia un mayor uso de sistemas autónomos y computarizados para la realización de tareas que requieran una elevada precisión. Siguiendo con esta tendencia, y en base a dos poderosas herramientas computacionales (Matlab y Webots), se ha desarrollado un entorno de simulación que posibilitará la visualización y evaluación de la ejecución de tareas agrícolas mediante el uso de flotas de robots, equipadas con diferentes mecanismos de percepción y actuación. Se espera que este entorno permita un mejor entendimiento de las capacidades o las insuficiencias del uso de robots en la agricultura, y constituya un medio de divulgación de nuevas técnicas y sistemas en los que se basa la Agricultura de Precisión.

### **2. Simulador realista.**

El uso de simuladores se encuentra presente en todos los ámbitos industriales, científicos y técnicos, ya que ayudan a un rápido desarrollo, visualización y evaluación de sistemas o mecanismos que pudieran ser innovadores. Se han estudiado simuladores enfocados tanto para la agricultura como para la robótica, y en base al conocimiento adquirido, se ha desarrollado un entorno de simulación que intenta la unificación de estas dos áreas muy diferentes, para poder observar en un mundo virtual en 3D la ejecución de tareas de AP en ambientes tan realistas como el usuario desee. Para ello es posible representar, tanto características reales del campo de cultivo (obtenidas mediante mediciones y presentes en bases de datos), así como el modelado de

diferentes variabilidades que puedan afectar en la ejecución de tareas de precisión efectuadas mediante flotas de robots.

### **3. Interacción práctica Simulador - Usuario**

Como base del entorno de simulación se ha utilizado la herramienta Webots, la cual permite crear universos en 3D y realizar simulaciones sobre robots. En conjunto con esta herramienta se ha diseñado una interfaz de configuración, basada en la herramienta Matlab, la cual ha permitido definir la estructura del universo virtual donde se desean evaluar tareas de precisión agrícola ejecutadas por unidades autónomas. Esta interfaz, de fácil manejo y gracias a su lenguaje de muy alto nivel, ha logrado una interacción sencilla para que el usuario pueda configurar las características del campo de cultivo que desea representar en el universo virtual en 3D.

### **4. Ejemplo práctico**

Para la evaluación del entorno desarrollado se ha diseñado una simple pero completa misión para la flota de robots del proyecto RHEA, la cual ha consistido en la aplicación precisa de herbicida sobre un campo infestado por malas hierbas. Para ello se han diseñado diferentes ciclos de control para el correcto desplazamiento de las unidades móviles que conforman la flota de robots por el campo de cultivo, así como el diseño de algoritmos para la representación de la aplicación del herbicida. Con dichos algoritmos, la flota de robots ha interpretado correctamente la tarea diseñada, donde el desplazamiento de las unidades móviles y la aplicación del herbicida sobre las malas hierbas virtuales se han realizado con el nivel de realismo deseado.

### **5. Divulgación eficiente**

A partir de la representación de esta misión se han generado un conjunto de grabaciones e imágenes instantáneas, con las cuales fue posible el desarrollo de un video de un minuto de duración. Dicho video fue presentado en el *Kick-off Meeting* del proyecto RHEA con la intención de ejemplificar la estructura de los robots que se desean desarrollar en el proyecto, así como también ilustrar la labor en conjunto que deben realizar los robots pertenecientes a dicha flota.

### **6. Código abierto**

Se pretende que el entorno de simulación desarrollado sea libremente compartido, para permitir a personas de diferentes disciplinas y que trabajan directamente con sistemas autónomos



aplicados a la agricultura de precisión, puedan usarlo, copiarlo, estudiarlo, modificarlo y redistribuido libremente. Esto ayudará a la evaluación rápida de diferentes algoritmos aplicados sobre flotas de robots en la agricultura, así como la elaboración simulaciones. Gracias a la posibilidad de generar videos e imágenes instantáneas, este entorno será de gran utilidad para ilustrar ideas innovadoras en el ámbito de la agricultura y la robótica.

## **7. Conclusión final**

En conclusión, este trabajo de fin de máster resulta de utilidad para estudiar y adquirir experiencia en el manejo de la herramienta de simulación de robots móviles denominada Webots, así como la inmersión en el área de la Agricultura de Precisión, conociendo los conceptos y las nuevas tendencias que están en desarrollo. Este entorno constituye un instrumento muy útil para la validación de conceptos de diseño, tanto de vehículos terrestres como aéreos, así como un dispositivo excepcional de análisis de misiones con la flota de robots del proyecto RHEA actualmente en desarrollo.



## Referencias Bibliográficas

- AirRobot GmbH & Co. KG, 2010. Disponible en: <http://www.airrobot.de/englisch/index.php>.
- Åstrand, B. y Baerveldt, A.J., 2002. An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control. *Autonomous Robots*, 13(1), págs.21–35.
- Bakker, T., 2009. An autonomous robot for weed control: design, navigation and control. Tesis Doctoral. *Wageningen Universiteit, The Netherlands*. Disponible en: <http://edepot.wur.nl/1099>.
- Barrientos, A. et al., 1997. *Fundamentos de robótica*, McGraw-Hill.
- Blasco, J. et al., 2002. Robotic Weed Control using Machine Vision. *Biosystems Engineering*, 83(2), págs.149–157.
- Bruyninckx, H., 2004. Blender for robotics and robotics for Blender. *Dept. of Mechanical Engineering, KU Leuven, Belgium*. Disponible en: <http://people.mech.kuleuven.be/~bruyinc/blender/roadmap.html>.
- Carberry, P.S. et al., 2002. The FARMSCAPE approach to decision support: farmers', advisers', researchers' monitoring, simulation, communication and performance evaluation. *Agricultural Systems*, 74(1), págs.141–177.
- Cardina, J., Johnson, G.A. y Sparrow, D.H., 1997. The Nature and Consequence of Weed Spatial Distribution. *Weed Science*, 45(3), págs.364-373.
- Carson, G., Puk, R. y Carey, R., 1999. Developing the VRML 97 international standard. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 19(2), págs.52-58.
- CROPS, 2010. Intelligent sensing and manipulation for sustainable production and harvesting of high value crop. Disponible en: <http://www.crops-robots.eu/>.
- Cyberbotics, 2010. Webots 6. Disponible en: <http://www.cyberbotics.com/>.
- Christensen, S. y Heisel, T., 1998. Patch spraying using historical, manual and real time monitoring of weeds in cereals. *J. Plant Diseases Prot.* XVI, págs. 257–263.
- DICKEY-john, 2011. Agricultural, Analytical, & Public Works Electronics. Disponible en: <http://www.dickey-john.com/>.
- Emmi, L., Guilherme, A. y González-de-Santos, P., 2010. Entorno de Simulación para Flotas de Robots: Aplicación a la Gestión de Malas Hierbas en Cultivos. *Robots de Exteriores*. Ed. R. E. Fernández y H. Montes. PGM, págs. 145-165.

- Fernández-Quintanilla, C., 2006. Perspectivas para la agricultura de precisión en España. *Vida rural*, (225), págs. 12-15.
- Freese, M. et al., 2010. Virtual robot experimentation platform V-REP: a versatile 3D robot simulator. *Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots: Second International Conference, Simpar 2010*. Darmstadt, Germany, págs. 51–62.
- GeoNames, 2010. Disponible en: <http://www.geonames.org/>.
- Gerhards, R. y Christensen, S., 2003. Real-time weed detection, decision making and patch spraying in maize, sugarbeet, winter wheat and winter barley. *Weed research*, 43(6), págs.385–392.
- Gerkey, B.P. et al., 2001. Most valuable player: A robot device server for distributed control. En *Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Maui, Hawaii, USA, págs. 1226–1231.
- Gerkey, B.P., Vaughan, R.T. y Howard, A., 2003. The player/stage project: Tools for multi-robot and distributed sensor systems. En *Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2003)*. Coimbra, Portugal, págs. 317–323.
- Goudriaan, J. y Van Laar, H.H., 1994. Modelling potential crop growth processes, Springer.
- Guilherme, A., Emmi, L. y González-de-Santos, P., 2010. Manipulador para la Gestión de Malas Hierbas en Agricultura de Precisión: Concepto del Sistema y Optimización de Tareas. *Robots de Exteriores*. Ed. R. E. Fernández y H. Montes. PGM , págs. 167-182.
- Hugues, L. y Bredeche, N., 2006. Simbad: an autonomous robot simulation package for education and research. En *Proceedings of The Ninth International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior (SAB'06)*. Roma, Italia, págs.831–842.
- Iida, M. et al., 2008. Localization of CO<sub>2</sub> source by a hexapod robot equipped with an anemoscope and a gas sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63(1), págs.73-80.
- Jeon, H.Y. y Tian, L.F., 2009. Direct application end effector for a precise weed control robot. *Biosystems Engineering*, 104(4), págs.458-464.
- Johns, K. y Taylor, T., 2008. Professional Microsoft robotics developer studio. Wrox Press Ltd. Birmingham, UK.
- Johnson, G.A., Mortensen, D.A. y Gotway, C.A., 1996. Spatial and Temporal Analysis of Weed Seedling Populations Using Geostatistics. *Weed Science*, 44(3), págs.704-710.
- Keating, B.A. et al., 2003. A n overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), págs.267–288.

- Lassaletta, L. y Rovira, J.V., 2005. Agricultura industrial y cambio global. *El Ecologista*, 45, págs.52 - 55.
- Lawes, R.A. y Robertson, M.J., 2011. Whole farm implications on the application of variable rate technology to every cropped field. *Field Crops Research*, In Press, Corrected Proof. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T6M-52777C2-1/2/9ae4daea92fb96e0a2838ae54aabbba15>.
- Lee, W.S., Slaughter, D.C. y Giles, D.K., 1996. Development of a machine vision system for weed control using precision chemical application. En *Proceedings of ICAME-96*. págs. 802-811.
- Lee, W.S., Slaughter, D.C. y Giles, D.K., 1999. Robotic weed control system for tomatoes. *Precision Agriculture*, 1(1), págs.95–113.
- Marshall, E.J.P., 1988. Field-scale estimates of grass weed populations in arable land. *Weed Research*, 28(3), págs.191-198.
- Martius, G. y Der, R., 2007. Ipzrobots — simulation tool for autoomous robots. Disponible en: <http://robot.informatik.uni-leipzig.de/>.
- McCown, R.L. et al., 1996. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, 50(3), págs.255–271.
- Micro-Trak, 2008. Disponible en: <http://www.micro-trak.com/>.
- Michel, O., 2004. Webots: Professional Mobile Robot Simulation. *Int. J. Advanced Robotic Syst*, 1(1), págs. 39–42.
- Oerke, E., Gerhards, R. y Menz, G., 2010. Precision Crop Protection - the Challenge and Use of Heterogeneity, Springer.
- ORC Incorporated, 2010. Disponible en: <http://www.ocnus.com/>.
- Raven Industries - RAVN, 2010. Disponible en: <http://www.ravenind.com/>.
- RHEA, 2011. Robot Fleets for Highly Effective Agriculture and forestry Management. Disponible en: <http://www.rhea-project.eu/>.
- Robert, P.C., 2002. Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management. *Plant and Soil*, 247(1), págs.143–149.

- Sciavicco, L. y Siciliano, B., 2000. Modelling and control of robot manipulators, Springer Verlag.
- Stöckle, C.O., Donatelli, M. y Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), págs.289–307.
- Terrain Generator for Webots, 2010. Disponible en:  
[http://www.cyberbotics.com/terrain\\_generator/](http://www.cyberbotics.com/terrain_generator/).
- Thornton, P. et al., 1990. Spatial weed distribution and economic thresholds for weed control. *Crop Protection*, 9(5), págs.337-342.
- Thorp, K.R. et al., 2008. Methodology for the use of DSSAT models for precision agriculture decision support. *Computers and Electronics in Agriculture*, 64(2), págs.276-285.
- Tian, L., 2002. Development of a sensor-based precision herbicide application system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2-3), págs.133-149.
- Valero-Ubierna, C., 2001. Agricultura de precisión: conceptos y situación actual. *Vida rural*, 8(136), págs.58–62.
- Vaughan, R.T., Gerkey, B.P. & Howard, A., 2003. On device abstractions for portable, reusable robot code. En *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ, Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*. Las Vegas, Nevada, US, págs. 2421–2427.
- Zhang, N., Wang, M. & Wang, N., 2002. Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2-3), págs.113–132.